



João Pedro Aurélio Pombeiro

**Contributos para o projeto de sistemas
SMES (*Superconducting Magnetic Energy
Storage*) para melhoria na qualidade da
energia**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: João Murta Pina, Professor Doutor, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Contributos para o projeto de sistemas SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) para melhoria na qualidade da energia.

Copyright © João Pedro Aurélio Pombeiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta etapa foi necessário o contributo de várias pessoas de forma a tornarem possível a redação desta dissertação, em que cada uma teve uma quota parte de importância para aquilo em que esta dissertação se tornou.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Murta Pina, pela importância que teve ao me guiar durante esta dissertação bem como pela sua disponibilidade ao longo de todo o período em que a desenvolvi.

Um grande agradecimento à minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, pelo apoio que sempre me deram ao longo de todas as etapas percorridas para chegar até ao fim desta dissertação. Sem eles nada teria sido possível.

Um especial agradecimento à Carolina, que sempre me apoiou, ajudou e compreendeu, que esteve sempre em todos os momentos desta caminhada, bem como em todas as etapas desde o momento em que entrou na minha vida.

Por último, mas sem menos relevância um muito obrigado a todos os meus amigos, desde os que fiz nesta instituição aos que me acompanham desde sempre, pois sem eles tudo teria sido bem mais difícil, senão impossível!

A todos os que tiveram um contributo de uma forma ou de outra, um grande agradecimento!

Obrigado!

Resumo

Existem vários sistemas de armazenamento de energia elétrica, esta dissertação irá incidir essencialmente nos sistemas *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES).

Inicialmente, para um melhor entendimento destes sistemas é necessário estudar conceitos como a supercondutividade e materiais supercondutores, particularmente os supercondutores de alta temperatura (HTS).

Nesta dissertação irão ser abordadas diversas aplicações destes sistemas. Serão destacados os sistemas SMES com tecnologia HTS, pois são os que vão ao encontro dos temas abordados ao longo do presente trabalho. Sendo realizada uma breve análise de como estes sistemas podem melhorar a qualidade da energia elétrica (QEE).

O principal contributo que esta dissertação pretende dar é a construção de um algoritmo (desenvolvido em software MATLAB) capaz de obter as especificações para o dimensionamento de uma bobina supercondutora para um sistema SMES. Os dados necessários por parte do utilizador são as especificações da fita supercondutora, a energia que o utilizador pretende armazenar, o número de bobinas que pretende utilizar e a distância entre bobinas.

Os resultados obtidos a partir do algoritmo são posteriormente simulados através de um software de elementos finitos (COMSOL Multiphysics) de forma a demonstrar que os mesmos são válidos.

Palavras-Chave: *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES), Qualidade de energia elétrica (QEE), supercondutividade, supercondutores de alta temperatura (HTS), bobina supercondutora.

ABSTRACT

There are many electric storage systems, In this dissertation the *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) is the one that is going to be discussed.

To have a better understanding of these systems one has study concepts like superconductivity and superconductor materials, specially the High temperature superconductor (HTS).

There are various applications for this type of system, the application of these systems will be addressed, particularly SMES with HTS technology and how these systems can improve power quality.

Through the development of an algorithm capable of obtaining the specifications for the design of a superconductor coil for a SMES system, where only the necessary data for the user are the superconductors tape specifications, energy the user intends store, the number of coils that are intends and the distance between them. The obtained results were later simulated through a software of finite elements, as to validate them.

Key-Words: *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES), Power quality, superconductivity, High temperature superconductor (HTS), superconductor coil

Simbologia

Símbolo	Descrição
B	Densidade de fluxo magnético (T).
$E_{armazenada}$	Energia armazenada (J).
H	Campo magnético (A/m).
H_c	Campo magnético crítico (A/m).
I	Corrente elétrica (A).
I_c	Corrente elétrica crítica (A).
J_c	Densidade de corrente crítica (A/m ²).
L	Coeficiente de auto-indução (H).
L_M	Coeficiente de indução mútua (H).
L_{Total}	Somatório do coeficiente de auto-indução com o coeficiente de indução Mútua (H).
M	Magnetização (A/m).
R	Resistência elétrica (Ω).
T	Temperatura (K).
T_c	Temperatura Crítica (K).
μ_0	Permeabilidade magnética do vazio ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$).

Notações

1 G	Fitas supercondutoras de primeira geração.
2 G	Fitas supercondutoras de segunda geração.
AC	Corrente alternada ou <i>Alternating current</i> .
BLCO	Supercondutor de composição química, $Ba_{0,15}La_{1,85}$.
BSCCO	Liga de bismuto, estrôncio, cálcio, cobre e oxigénio.
DC	Corrente continua ou <i>Direct current</i> .
HTS	Supercondutor de alta temperatura ou <i>High temperature superconductor</i> .
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , ou seja, Instituto de Engenheiros Eléctricos e Electrónicos.
LTS	Supercondutor de baixa temperatura ou <i>Low Temperature Superconductor</i> .
QEE	Qualidade da Energia Eléctrica.
SMES	Acrónimo de <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i> , ou electromagnetos Supercondutores para armazenamento de energia.
YBCO	Liga de ítrio, bário, cobre e oxigénio.
THD	Taxa de distorção harmónica ou Total Harmonic Distortion

Índice

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	MOTIVAÇÃO	1
1.2.	OBJETIVOS	2
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.	INTRODUÇÃO.....	3
2.2.	SUPERCONDUTIVIDADE	3
2.2.1.	RESISTIVIDADE NULA.....	4
2.2.2.	PROPRIEDADES DE MATERIAIS SUPERCONDUTORES	5
2.2.3.	EFEITO MEISSNER.....	6
2.2.4.	SUPERCONDUTORES DO TIPO I E DO TIPO II.....	6
2.2.5.	SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA (HTS).....	8
2.3.	SISTEMAS SMES (SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE)	10
2.3.1.	ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	10
2.3.2.	FUNCIONAMENTO E CONSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA SMES	12
2.3.3.	MODOS DE FUNCIONAMENTO DE UM SMES.....	13
2.3.4.	APLICAÇÕES SMES	15
2.3.5.	PROJETOS SMES COM TECNOLOGIA HTS	18
2.3.6.	PROJETOS IMPLEMENTADOS DE SISTEMAS SMES PARA A MELHORIA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)	23
2.3.7.	INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS SMES NA MELHORIA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA.....	24
2.4.	FILTROS HARMÓNICOS PARA MELHORAR A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	25
2.5.	SÍNTESE DO CAPÍTULO	28
3.	CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO ALVO	29
3.1.	INTRODUÇÃO.....	29
3.2.	GERADOR EÓLICO	29
3.2.1.	ANÁLISE DE DADOS RECOLHIDOS.....	31
3.3.	SÍNTESE DO CAPÍTULO	35
4.	CONTRIBUTO PARA O PROJETO DE SMES.....	37
4.1.	INTRODUÇÃO.....	37
4.2.	ALGORITMO PARA DIMENSIONAMENTO DA BOBINA SUPERCONDUTORA PARA UM SISTEMA SMES.....	37
4.2.1.	CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE FITA SUPERCONDUTORA PARA UMA BOBINA.....	41
4.2.2.	CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE FITA SUPERCONDUTORA NECESSÁRIA E DA INDUTÂNCIA TOTAL PARA VÁRIAS BOBINAS EM FUNÇÃO DA ENERGIA ARMAZENADA PRETENDIDA.....	42
4.2.3.	CÁLCULO DA INDUTÂNCIA TOTAL DAS BOBINAS DADO O COMPRIMENTO DE FITA SUPERCONDUTORA QUE SE PRETENDE UTILIZAR POR CADA BOBINA.....	44
4.3.	DIMENSIONAMENTO EM AMBIENTE MATLAB.....	45

4.4.	SIMULAÇÃO EM AMBIENTE COMSOL MULTIPHYSICS.....	51
4.4.1.	SIMULAÇÃO DA TOPOLOGIA TOROIDAL	58
4.5.	SÍNTESE DO CAPÍTULO	62
5.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	63
5.1.	CONCLUSÕES	63
5.2.	TRABALHO FUTURO.....	63
	BIBLIOGRAFIA	65

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - GRÁFICO HISTÓRICO DA RESISTÊNCIA (Ω) EM RELAÇÃO À TEMPERATURA (K) QUE MOSTRA A QUEDA ABRUPTA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO MERCÚRIO AOS 4,2 K. EXPERIÊNCIA EFETUADA POR HEIKE KAMERLINGH ONNES EM 26 DE OUTUBRO DE 1911. RETIRADO DE [3].....	4
FIGURA 2.2 - DIAGRAMA T - J - H . SENDO QUE J_c , H_c , E T_c REPRESENTAM, RESPECTIVAMENTE, A DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA, O CAMPO MAGNÉTICO CRÍTICO E A TEMPERATURA CRÍTICA. RETIRADO DE [5].....	5
FIGURA 2.3 - MAGNETIZAÇÃO DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO I, RETIRADO DE [5].	7
FIGURA 2.4 - MAGNETIZAÇÃO DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO II, RETIRADO EM [5].	7
FIGURA 2.5 - EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DA DESCOBERTA DE MATERIAIS SUPERCONDUTORES, RETIRADO DE [10].	8
FIGURA 2.6 - FITA DE MATERIAL SUPERCONDUTOR (1 G), RETIRADO DE [8].	9
FIGURA 2.7 - DIAGRAMA DAS CAMADAS DE UMA FITA DE 2 G DA <i>AMERICAN SUPERCONDUCTOR</i>	10
FIGURA 2.8 - DIAGRAMA DE UM SMES LIGADA À REDE, RETIRADO DE [5].	13
FIGURA 2.9 - CONVERSOR EM FONTE DE TENSÃO COM <i>CHOPPER</i> , RETIRADO DE [23].	14
FIGURA 2.10 - A IMAGEM DA ESQUERDA REPRESENTA O MODO DE CARGA DO SMES, A DO MEIO O MODO PERSISTENTE E A IMAGEM DA DIREITA O MODO DE DESCARGA DO SMES, RETIRADO DE [5].	15
FIGURA 2.11 - PERTURBAÇÕES DE QEE, RETIRADO DE [31].	17
FIGURA 2.12 - RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA/ENERGIA EM UNIDADE DE MASSA, EM DIFERENTES TECNOLOGIAS, ADAPTADO DE [19].	17
FIGURA 2.13 - À ESQUERDA ESTÁ A PRIMEIRA SUBESTAÇÃO MUNDIAL COM TECNOLOGIA HTS, IMAGEM RETIRADA DE [37], À DIREITA ESTÁ O SMES HTS USADA NO PROJETO DA PRIMEIRA SUBESTAÇÃO MUNDIAL, IMAGEM RETIRADA DE [35].	19
FIGURA 2.14 - VISÃO GERAL DO CONTENTOR QUE CONTEM O SISTEMA SMES PORTÁTIL, RETIRADO DE [39].....	20
FIGURA 2.15 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO DO PARQUE EÓLICO COM SMES, ADAPTADO DE [43].	24
FIGURA 2.16 - FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICAS, RETIRADO [1].	25
FIGURA 2.17 - FILTRO ATIVO SIMPLIFICADO LIGADO EM PARALELO, RETIRADO DE [1].	26
FIGURA 2.18 - FORMAS DE ONDA E RESPECTIVOS ESPECTROS HARMÔNICOS, RETIRADO DE [1].	26
FIGURA 2.19 - EXEMPLO DE UM FILTRO HÍBRIDO, RETIRADO DE [1].	27
FIGURA 3.1 - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES COM O GERADOR EÓLICA NA PARTE SUPERIOR DO EDIFÍCIO.	30
FIGURA 3.2 - INVERSORES DO GERADOR EÓLICO COM O ANALISADOR DE ENERGIA A EFETUAR MEDIÇÕES.	31
FIGURA 3.3 - GRÁFICO RELATIVO À VARIAÇÃO DA THDI ENTRE O DIA 27/03/2018 E 02/04/2018 DO GERADOR EÓLICO À SAÍDA DO INVERSOR.	32
FIGURA 3.4 - GRÁFICO REFERENTE À VARIAÇÃO DO VALOR DA COMPONENTE FUNDAMENTAL DA HARMÔNICA DE CORRENTE.	33
FIGURA 3.5 - ESPETRO DE HARMÔNICAS DE CORRENTE E RESPECTIVA TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE.	34
FIGURA 3.6 - FORMA DE ONDA DE CORRENTE E DE TENSÃO.....	34
FIGURA 4.1 - REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UMA BOBINA EM PANQUECA ONDE (A) REPRESENTA O RAIOS MÉDIO, (B) ALTURA E (C) A LARGURA TOTAL DA FITA, RETIRADO DE [46].	38
FIGURA 4.2 - REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES DE DUAS BOBINAS CONCÊNTRICAS, RETIRADO DE [46].	40

FIGURA 4.3 - FLUXOGRAMA RELATIVO AO CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE FITA SUPERCONDUTORA PARA UMA BOBINA DESENVOLVIDO EM MATLAB.....	42
FIGURA 4.4 - FLUXOGRAMA RELATIVO AO CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE FITA SUPERCONDUTORA NECESSÁRIA E DA INDUTÂNCIA TOTAL PARA VÁRIAS BOBINAS EM FUNÇÃO DA ENERGIA QUE SE PRETENDE ARMAZENAR.....	43
FIGURA 4.5 - FLUXOGRAMA RELATIVO AO TERCEIRO SEGMENTO DO ALGORITMO DESENVOLVIDO, CÁLCULO DA INDUTÂNCIA TOTAL DADO UM COMPRIMENTO DE FITA SUPERCONDUTORA.	44
FIGURA 4.6 - GRÁFICO RELATIVO A INDUTÂNCIA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO TOTAL DE FITA SUPERCONDUTORA PARA A CONFIGURAÇÃO PARA UMA BOBINA.	47
FIGURA 4.7 - GRÁFICOS RELATIVOS À INDUTÂNCIA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO TOTAL DE FITA SUPERCONDUTORA PARA A CONFIGURAÇÃO COM DUAS BOBINAS EM A) E COM TRÊS BOBINAS EM B).	48
FIGURA 4.8 - GRÁFICOS RELATIVOS À INDUTÂNCIA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO TOTAL DE FITA SUPERCONDUTORA PARA A CONFIGURAÇÃO COM QUATRO BOBINAS EM A) E COM CINCO BOBINAS EM B).	48
FIGURA 4.9 - GRÁFICO COM AS DIFERENTES CURVAS REFERENTES ÀS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DIMENSIONADAS PARA UM VALOR DE 100 mH DE INDUTÂNCIA TOTAL.	49
FIGURA 4.10 - GRÁFICO COM AS DIFERENTES CURVAS REFERENTES ÀS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA UM VALOR MÁXIMO DE 1000 m DE FITA SUPERCONDUTORA PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DIMENSIONADAS. ...	50
FIGURA 4.11 - VALOR DE INDUTÂNCIA TOTAL PARA 1000 m DE FITA SUPERCONDUTORA PARA CADA CONFIGURAÇÃO.	50
FIGURA 4.12 - EXEMPLO DA MALHA CRIADA PARA A SIMULAÇÃO PARA A CONFIGURAÇÃO COM UMA BOBINA.	51
FIGURA 4.13 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS PARA A CONFIGURAÇÃO DE UMA BOBINA NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM PLANTA.	52
FIGURA 4.14 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM PLANTA PARA A CONFIGURAÇÃO COM DUAS BOBINAS.	53
FIGURA 4.15 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM ALÇADO PARA A CONFIGURAÇÃO COM DUAS BOBINAS.	53
FIGURA 4.16 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM PLANTA PARA A CONFIGURAÇÃO COM TRÊS BOBINAS.....	54
FIGURA 4.17 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM ALÇADO PARA A CONFIGURAÇÃO COM TRÊS BOBINAS.....	54
FIGURA 4.18 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM PLANTA PARA A CONFIGURAÇÃO COM QUATRO BOBINAS.....	55
FIGURA 4.19 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM ALÇADO PARA A CONFIGURAÇÃO COM QUATRO BOBINAS.....	55
FIGURA 4.20 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM PLANTA PARA A CONFIGURAÇÃO COM CINCO BOBINAS.....	56
FIGURA 4.21 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM COMSOL ATRAVÉS DA VISTA EM ALÇADO PARA A CONFIGURAÇÃO COM CINCO BOBINAS.....	56
FIGURA 4.22 - VARIAÇÃO DO VALOR DE INDUTÂNCIA TOTAL ENTRE O DIMENSIONADO EM MATLAB EM FUNÇÃO DOS VALORES OBTIDOS NA SIMULAÇÃO NO SOFTWARE COMSOL.	57
FIGURA 4.23 - VISTA EM PLANTA DA SIMULAÇÃO EM SOFTWARE COMSOL DA CONFIGURAÇÃO COM CINCO BOBINAS DA TOPOLOGIA TOROIDAL, COM UM RAIO DE 100 mm.	59
FIGURA 4.24 - VISTA EM PLANTA DA SIMULAÇÃO EM SOFTWARE COMSOL DA CONFIGURAÇÃO COM DEZ BOBINAS DA TOPOLOGIA TOROIDAL, COM UM RAIO DE 100 mm.	60

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 - PROJETOS SMES HTS	22
TABELA 3.1- ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR EÓLICO EM ANÁLISE [45].	30
TABELA 4.1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA FITA SUPERCONDUTORA UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO, ADAPTADO DE [49].	45
TABELA 4.2 - PROPRIEDADES ELÉTRICAS DA FITA SUPERCONDUTORA A 77 K, EM AUTO CAMPO, 1 mV/cm, POR 1 m DE RESOLUÇÃO, ADAPTADO DE [49].	45
TABELA 4.3 - VALORES QUE SE PRETENDE OBTER PARA A BOBINA SUPERCONDUTORA DO SISTEMA SMES.	45
TABELA 4.4 - VALORES OBTIDOS PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES TESTADAS, COM 5 mm DE DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E COM $I_C=245$ A, PARA OS VALORES PRETENDIDOS NA TABELA 4.3.	46
TABELA 4.5 - VALORES DA INDUTÂNCIA TOTAL PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES ANALISADAS.	47
TABELA 4.6 - RESULTADOS OBTIDOS EM SIMULAÇÃO NO SOFTWARE COMSOL.....	57
TABELA 4.7 - VALORES DA INDUÇÃO TOTAL OBTIDOS PARA TOPOLOGIA TOROIDAL COM 5 BOBINAS CONSOANTE A VARIAÇÃO DO VALOR DO RAIO.....	59
TABELA 4.8-COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE A TOPOLOGIA TOROIDAL COM 5 BOBINAS E 10 BOBINAS AMBAS COM UM RAIO DE 100 mm ATÉ AO CENTRO DO NÚCLEO DE AR DA BOBINA.....	60
TABELA 4.9 - VALORES DA INDUÇÃO TOTAL OBTIDOS PARA TOPOLOGIA TOROIDAL COM 10 BOBINAS CONSOANTE A VARIAÇÃO DO VALOR DO RAIO.....	61

1. Introdução

1.1. Motivação

A qualidade da energia elétrica (QEE) é um fator relevante para a competitividade em diversas atividades económicas. O conceito de qualidade da energia elétrica (QEE) tem estado em constante alteração devido ao avanço tecnológico.

Atualmente, novos parâmetros têm vindo a ganhar maior relevância neste conceito (QEE), o qual, inicialmente, passava por garantir que existia uma continuidade de serviço. Parâmetros como a amplitude e a frequência de tensão, o desequilíbrio de tensões e a distorção harmónica, devido à proliferação de dispositivos eletrónicos ligados à rede, têm adquirido grande relevância [1].

Existem várias soluções e tecnologias que podem ser utilizadas para mitigar os problemas associados à QEE. Neste trabalho, iremos destacar os Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES), pois são sistemas com características promissoras na melhoria da QEE. Estes sistemas têm a capacidade para conseguir suavizar perturbações em sistemas de potência e conseguem fornecer uma rápida resposta de injeção de potência na rede (na ordem dos *ms*). Estas aplicações serão posteriormente analisadas nesta dissertação [2].

Sendo a bobina supercondutora considerada o coração dos SMES é relevante desenvolver uma ferramenta capaz de facilitar a construção e o dimensionamento da mesma, de modo a que o processo do seu dimensionamento seja mais rápido e menos complexo em relação às maneiras convencionais existentes.

1.2. Objetivos

Esta dissertação pretende estudar os benefícios da utilização de um sistema SMES na melhoria da qualidade da energia elétrica (QEE). Este trabalho tentará dar um contributo para a utilização destes sistemas na rede elétrica, de modo que possam vir a ter um papel mais preponderante na QEE.

O principal objetivo desta dissertação passa por efetuar o dimensionamento da bobina supercondutora de um sistema SMES. Através do programa MATLAB ir-se-á desenvolver o algoritmo e pelas simulações no programa de elementos finitos COMSOL Multiphysics, validar os resultados obtidos pelo mesmo algoritmo, de modo a que contribua para o dimensionamento de um sistema SMES.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação divide-se nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 - Introdução: Serão abordadas as motivações e os objetivos que a dissertação pretende alcançar.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: É efetuado o levantamento bibliográfico de matérias que são relevantes para o desenvolvimento desta dissertação. Irão ser explanados dois temas principais: Supercondutividade e os sistemas SMES.

Capítulo 3 - Caracterização da instalação alvo: Capítulo referente às medições à saída do inversor do gerador eólico, de modo a se aferir a qualidade da energia.

Capítulo 4 - Contributo para o projeto SMES: Neste capítulo, será efetuado o estudo e o dimensionamento da bobina supercondutora para um sistema SMES, sob um algoritmo que através das características da fita supercondutora e da energia que se pretende armazenar, consegue obter as especificações para a construção da bobina supercondutora, sendo estes resultados validados no software de elementos finitos COMSOL Multiphysics.

Capítulo 5 - Conclusões e trabalho futuro: Capítulo referente às conclusões retiradas desta dissertação, bem como a análise do trabalho futuro que poderá vir a ser desenvolvido.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Neste capítulo serão analisados os conceitos mais relevantes para o enquadramento da dissertação, sendo que recairão maioritariamente sobre dois temas principais: o primeiro relativo à supercondutividade, onde se irão abordar os conceitos mais importantes para a realização desta dissertação. O segundo tema principal, será os SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), onde se irá analisar a sua evolução, funcionamento e alguns projetos desenvolvidos.

2.2. Supercondutividade

O século XX, mais concretamente no ano de 1911, ficou marcado pela descoberta do fenómeno da supercondutividade. O físico holandês Heike Kamerlingh Onnes foi o responsável por descobrir este fenómeno no seu laboratório. Ao estudar as propriedades das substâncias a baixas temperaturas deparou-se com a queda abrupta da resistência elétrica no mercúrio no valor de 4,20 K [3], contrariando assim as teorias existentes na época em questão.

Ao verificar-se a queda abrupta da resistência a uma determinada temperatura, este acontecimento designa-se por temperatura crítica T_c . Anteriormente só se sabia que a resistência dos materiais reduzia com a diminuição da temperatura. No entanto, nunca nenhuma teoria tinha sido realmente comprovada e aceite pela comunidade científica [4], [5]. Tal só foi conseguido através da liquidação do hélio quando a sua temperatura atingiu os 0,90 K [6]. Esta descoberta em meados de 1908 permitiu que a temperatura dos materiais diminuísse bastante.

Como já foi referido e é visível na Figura 2.1, quando se atinge a temperatura de 4,2 K no mercúrio a resistividade cai para valores praticamente nulos. A este fenómeno dá-se o nome de supercondutividade, isto é, um material passa do estado normal para o estado supercondutor quando este atinge uma temperatura inferior à sua temperatura crítica T_c .

É importante realçar que a temperatura crítica T_c é diferente de material para material, não sendo este um valor constante [7]. Só em certos materiais se consegue obter o chamado estado supercondutor, sendo que inicialmente só se conseguiu chegar à temperatura crítica T_c em materiais da família dos metais.

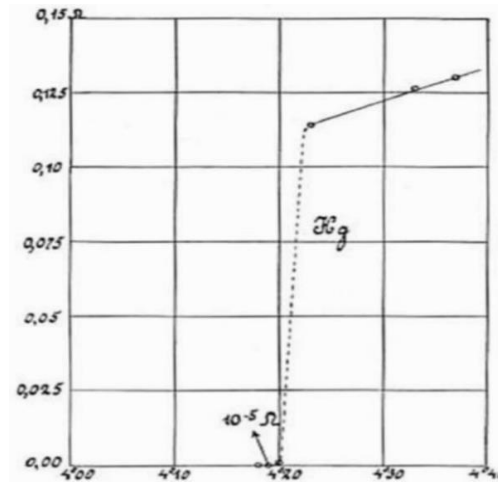


Figura 2.1 - Gráfico histórico da resistência (Ω) em relação à temperatura (K) que mostra a queda abrupta da resistência elétrica do mercúrio aos 4,2 K. Experiência efetuada por Heike Kamerlingh Onnes em 26 de outubro de 1911. Retirado de [3].

2.2.1. Resistividade nula

Quando se alcança um valor abaixo da temperatura crítica T_c certos materiais apresentam uma resistência que é considerada virtualmente nula, contrapondo com os condutores convencionais. Para certos materiais passarem para o estado de supercondutor têm de ser arrefecidos para temperaturas muito baixas (inferiores a 70 K).

A ausência de resistividade de um material não pode ser medida directamente, isto é, não se pode medir a ausência de resistividade através dos convencionais aparelhos de medida, pois estes estão condicionados pela sua resolução. Assim sendo, a forma mais correta será efectuar-se um ensaio, onde através da medição da densidade de fluxo causada por correntes persistentes em anéis supercondutores perfeitos, estas correntes ao não apresentarem um decréscimo que seja relevante ao longo de um considerável intervalo de tempo, indicam que a resistividade do material é nula [4], [5].

Através da modelação de um anel supercondutor, sendo τ a constante de tempo do anel supercondutor, R uma resistência e L uma bobina, e dado que $\tau = \frac{L}{R}$, ao se estabelecer uma corrente I_0 , ou seja corrente que é imposta ao anel, temos que a equação (2.1) vai descrever o decaimento da corrente em relação ao tempo [5]:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.1)$$

Quando o anel está no estado supercondutor, $R \rightarrow 0$ significa que $\tau \rightarrow \infty$. Nestas condições a corrente vai ser constante ficando assim que:

$$I(t) = I_0 \text{ com } t \geq 0 \quad (2.2)$$

Existindo assim o estabelecimento de correntes persistentes no condutor através da medição da densidade de fluxo magnético, comprova-se que não existe uma diminuição da corrente desde de que o estado supercondutor se mantenha [5].

2.2.2. Propriedades de Materiais Supercondutores

Para que um material seja considerado supercondutor tem de respeitar certas características, isto é, tem de possuir propriedades e grandezas que façam deste um supercondutor. Para tal as três grandezas físicas que condicionam a supercondutividade são a temperatura crítica (T_c), densidade de corrente crítica (J_c) e campo magnético crítico (H_c).

Sendo a densidade de corrente crítica (J_c) o valor máximo de densidade de corrente elétrica que um supercondutor pode transportar sem que este passe para o estado normal. O campo crítico (H_c) é o valor do campo magnético que destrói o estado supercondutor [8]. A temperatura crítica (T_c), a densidade de corrente e o campo magnético são dependentes entre si, dando origem ao diagrama T - J - H , que está representado na Figura 2.2.

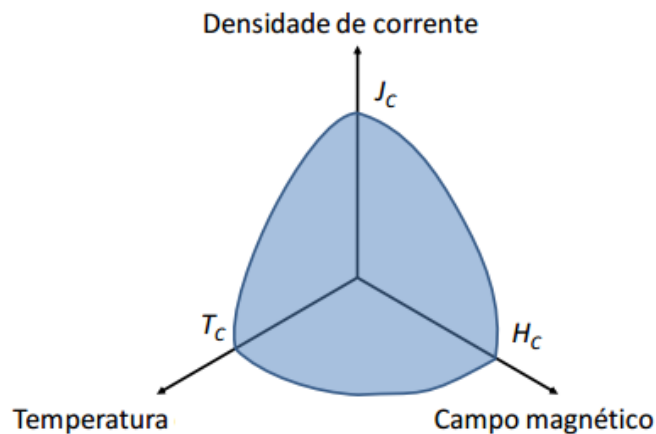


Figura 2.2 - Diagrama T - J - H . Sendo que J_c , H_c , e T_c representam, respetivamente, a densidade de corrente crítica, o campo magnético crítico e a temperatura crítica. Retirado de [5].

O material é supercondutor quando se encontra dentro do volume indicado a sombreado na Figura 2.2.

2.2.3. Efeito *Meissner*

No ano de 1933, os físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfel ao arrefecerem uma esfera de estanho puro, descobriram que esta, quando abaixo da sua temperatura crítica T_c , na presença de um campo magnético, iria expelir o fluxo magnético do seu interior. Concluiu-se então que o material apresentava um diamagnetismo perfeito, a este feito deu-se o nome de *Efeito de Meissner* [4], [8].

Para um material ser considerado um supercondutor perfeito deve possuir duas propriedades: resistência elétrica nula e um diamagnetismo perfeito [8].

Sendo que a densidade de fluxo no interior de um supercondutor é descrita pela equação dada em (2.3).

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.3)$$

Sendo que B representa a densidade de fluxo magnético, H o campo magnético e M a magnetização. Ao se verificar que $B=0$, conclui-se que $M=-H$, a magnetização tem assim módulo igual e sentido contrário ao do campo aplicado [5].

2.2.4. Supercondutores do tipo I e do tipo II

Os materiais supercondutores são classificados por serem do tipo I ou do tipo II. Esta classificação veio através do comportamento dos materiais na presença de um campo magnético externo.

- **Supercondutores do tipo I**

Este tipo de materiais supercondutores foram os primeiros a serem descobertos e normalmente são metais puros e ligas binárias. Os mesmos possuem uma temperatura crítica T_c muito baixa, sendo que estes, quando se encontram abaixo da sua temperatura crítica, expõem o fluxo magnético presente no seu interior, dando assim origem ao chamado estado *Meissner*, isto para valores do campo magnético H aplicado inferiores a um determinado valor de H_c . Estes podem ainda funcionar como diamagnetos perfeitos, não permitindo assim a penetração de campos magnéticos [7], [4], [8].

Na Figura 2.3 está representado a transição de estado num supercondutor do tipo I:

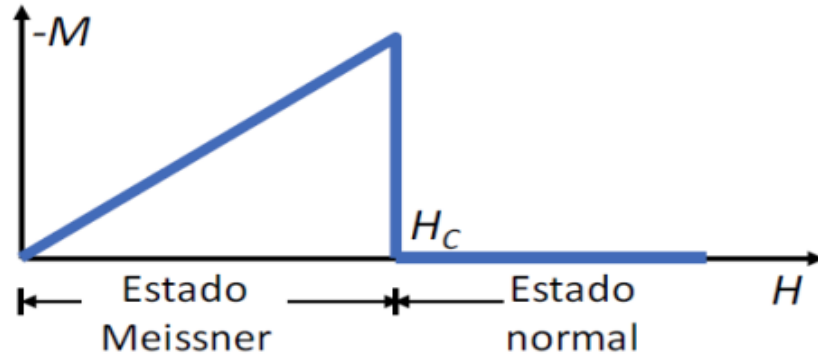


Figura 2.3 - Magnetização de um supercondutor do tipo I, retirado de [5].

Os supercondutores do tipo I pertencem ao grupo dos chamados supercondutores de baixa temperatura (LTS) estes são arrefecidos geralmente por recurso a hidrogénio ou hélio líquidos [8].

- **Supercondutores do tipo II**

As diferenças entre os supercondutores do tipo II e do tipo I são notórias. Os materiais dos supercondutores do tipo II são essencialmente construídos através de ligas metálicas e por compostos. Normalmente apresentam uma temperatura crítica T_c mais alta, têm um comportamento diferente na curva de magnetização existindo um terceiro estado (estado misto).

Se nos supercondutores do tipo I se passava diretamente do estado Meissner para o estado normal, nos supercondutores de tipo II, entre os dois estados referidos anteriormente, aparece o chamado estado misto, no qual existe penetração do fluxo magnético no material, sem que exista uma destruição da supercondutividade no mesmo [4], [5].

Na Figura 2.4 está representada a transição de estados num supercondutor do tipo II:

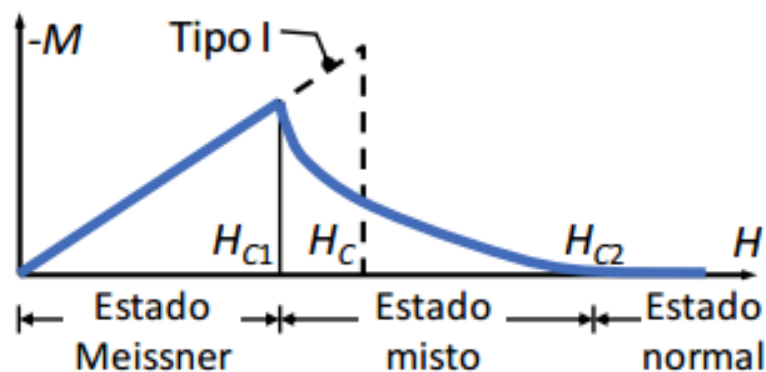


Figura 2.4 - Magnetização de um supercondutor do tipo II, retirado em [5].

Os chamados supercondutores de alta temperatura (HTS) pertencem todos ao grupo dos supercondutores do tipo II, sendo que estes podem ser arrefecidos por azoto líquido, um componente bastante abundante no ar, tornando-o assim um líquido criogénico relativamente barato [8].

2.2.5. Supercondutores de Alta Temperatura (HTS)

Durante algumas décadas a temperatura crítica dos materiais supercondutores manteve-se praticamente inalterável, abaixo de cerca de 20 K. Na altura pensava-se que a temperatura crítica pouco mais iria subir [5].

Existiu uma mudança radical, em 1986, quando Georg Bednorz e Karl Müller observaram no laboratório da IBM em Zurique que no composto cerâmico $Ba_{0.15}La_{1.85}$ ou simplesmente BLCO, verificaram a existência de supercondutividade a temperaturas críticas de cerca de 30 K. Este acontecimento foi uma mudança de paradigma [5],[9]. Uma vez que esta barreira tinha sido superada, vários cientistas começaram a estudar novos materiais de modo a descobrirem novas temperaturas críticas mais elevadas [9]. Através desta descoberta surgiram os chamados supercondutores de alta temperatura (HTS). Nesta dissertação considera-se que o material é HTS quando a sua temperatura crítica se situa acima dos 77 K.

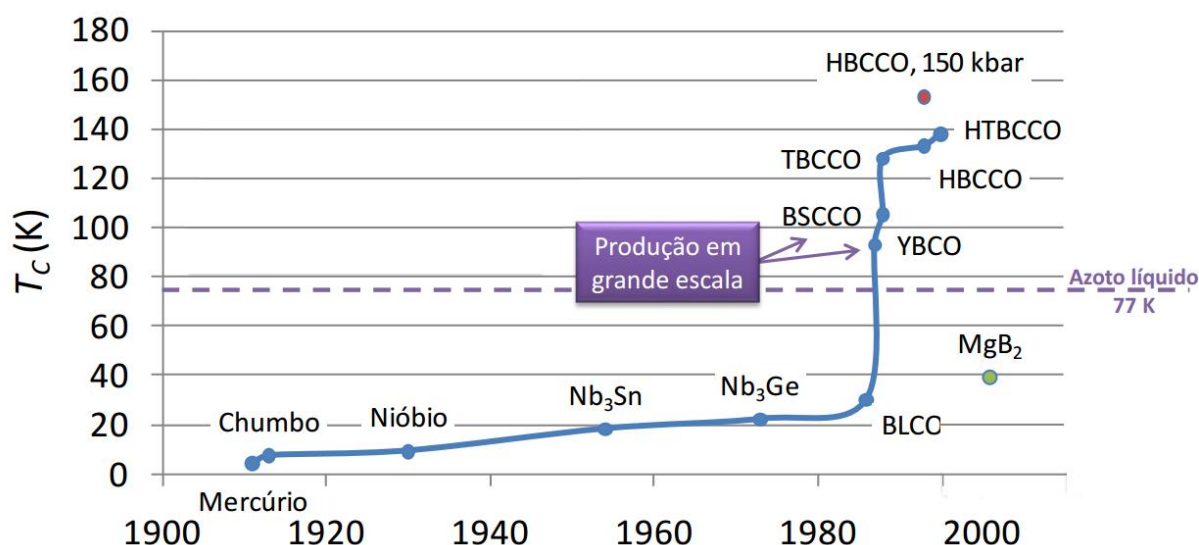


Figura 2.5 - Evolução cronológica da descoberta de materiais supercondutores, retirado de [10].

Os materiais supercondutores tecnologicamente mais usados são os YBCO e BSCCO que são abreviaturas para o óxido de Y-Ba-Cu-O e para a liga Bi-Sr-Ca-Cu-o, respetivamente. A supercondutividade no óxido de Y-Ba-Cu-O só foi descoberta no ano de 1987 nos Estados Unidos da América e possui uma temperatura crítica de 93 K para $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ onde x , representa o conteúdo de oxigénio e determina as propriedades condutoras do material. Este material também é chamado de YBCO-123.

Em 1988, a temperatura crítica atingiu os 110 K, para $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$. Este material é genericamente chamado de BSCCO-2223. Como as temperaturas de ambos são acima dos 77 K usa-se azoto líquido para os arrefecer, diminuindo os custos associados ao arrefecimento [5], [8], [11].

Os supercondutores de alta temperatura mais utilizados, ou seja, o BSCCO e o YBCO, aparecem comercialmente sobre duas formas, a maciça ou sobre a forma de fita [5].

Este trabalho vai ter uma maior incidência no estudo dos HTS em forma de fita, sendo estes supercondutores divididos em primeira e segunda geração.

- **Supercondutores de primeira geração (1 G)**

Os supercondutores de primeira geração são constituídos por BSCCO sobre a forma de fita supercondutora, sendo estes filamentos de BSCCO embebidos numa matriz de prata, adquirindo por isso uma maior flexibilidade e robustez mecânica.

Existe, no entanto, um limite mínimo do raio de flexão para que as propriedades supercondutoras que a fita possui não se degradem. Situa-se esse limite na ordem das poucas dezenas de milímetros. Atualmente a produção é feita na ordem dos Km de comprimento. No entanto, a segunda geração (2 G), tem vindo a ganhar cada vez mais relevância [5], [8].

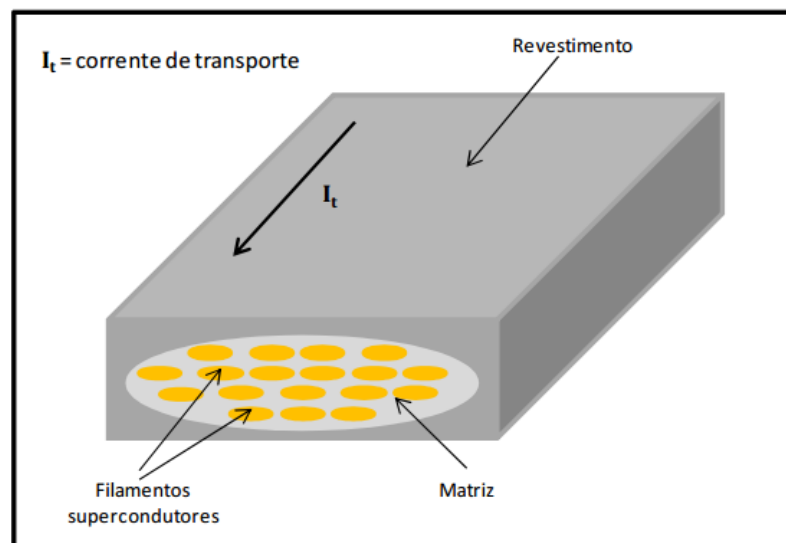


Figura 2.6 - Fita de material supercondutor (1 G), retirado de [8].

- **Supercondutores de segunda geração (2 G)**

As fitas de segunda geração são bastante diferentes das de primeira geração. Estas fitas consistem no conjunto de camadas com uma determinada ordem. A fita começa a partir de um substrato metálico flexível, em seguida faz-se uma deposição de várias camadas intermédias que irão facilitar a

adesão da próxima camada que é o supercondutor (YBCO). Por fim é tudo coberto por camadas que vão estabilizar e permitir conexões [12].

Esta geração de fitas supercondutores têm causado cada vez um maior interesse, não obstante o facto de ser mais cara que a 1 G e de ter um comprimento máximo na ordem dos 1000 metros. Estas fitas têm, no entanto, um melhor desempenho que as de 1 G. Isto reside no facto de ser possível a operação em campos e temperaturas mais elevadas e com densidade de correntes críticas superiores às obtidas nas fitas de 1 G. Estas possuem melhores propriedades mecânicas, pois conseguem ter uma maior tensão de tração crítica e maior extensão de flexão, possuindo ainda uma melhor homogeneidade do material em relação à tecnologia de 1 G [5].

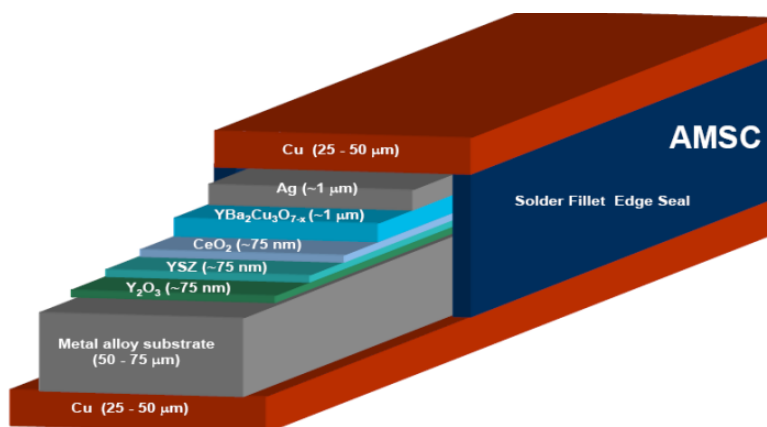


Figura 2.7 - Diagrama das camadas de uma fita de 2 G da *American Superconductor*.

2.3. Sistemas SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*)

Os sistemas SMES são dispositivos que armazenam energia no campo magnético de uma bobina supercondutora percorrida por uma corrente contínua. Estes sistemas são constituídos essencialmente por um bobina supercondutora, por um sistema de condicionamento de potência e por um sistema de controlo [5].

Existem diversas aplicações para este tipo de sistemas, no que diz respeito à melhoria da QEE, podendo ser estes dispositivos objeto de interesse nesta matéria [1].

2.3.1. Enquadramento Histórico

Os sistemas SMES foram inicialmente concebidos como uma fonte de energia na década de 70. Foi proposto por M.Ferrier a realização de um projeto que iria armazenar uma grande quantidade de energia num único sistema, com o objetivo de harmonizar as variações de procura de energia no período diurno [13].

Através desta proposta houve um desencadear de estudos que levaram a novas propostas para a aplicação dos SMES, tendo surgido então os primeiros projetos de larga escala aplicados em estações de energia. O principal intuito foi solucionar o problema da estabilização da rede existente nos sistemas de energia elétrica que possuíam grandes cargas e onde os sistemas de geração se encontravam a grandes distâncias [14].

Inicialmente os sistemas SMES foram desenvolvidos com tecnologia LTS, a única disponível na altura, no entanto, como já foi referida neste documento, em 1986 surgiram os supercondutores de alta temperatura (HTS). Inicialmente pouco vieram acrescentar, só mais tarde viriam a revelar-se importantes neste tipo de sistemas. Considere-se assim que os SMES podem ser desenvolvidos a partir de dois tipos de tecnologias, nomeadamente:

- **SMES com tecnologia LTS**

Inicialmente a única tecnologia existente eram os supercondutores LTS. Nos Estados Unidos da América em 1979 foi instalada na subestação de Tacoma um SMES [14]. Depois do projeto ser bem-sucedido vários projetos por todo o mundo começaram a desenvolver-se.

Atualmente esta tecnologia é comercializada por várias empresas [15]. Desde 2011 no Japão realizaram-se três projetos para compensar as quedas de tensão instantâneas [16]. No entanto, devido ao elevado custo do sistema SMES com tecnologia LTS, não foi possível obter grande sucesso no mercado [15].

- **SMES com tecnologia HTS**

Com o surgimento dos supercondutores de alta temperatura e com o aumento da disponibilidade de fita HTS levou-se à investigação da utilidade destes inseridos num sistema SMES.

Durante as décadas de 80 e 90 foram realizados diversos projetos e investigações que analisaram as vantagens da bobina supercondutora em material HTS. Concluiu-se então que estas apenas seriam rentáveis para aplicações onde o campo magnético fosse muito elevado em comparação com a tecnologia LTS, de forma a que esta tecnologia se tornasse competitiva através de uma melhoria na densidade de corrente crítica (J_c) ou através de uma redução de custos do material [17], [7].

Através da tecnologia HTS, mas também do aparecimento dos supercondutores de segunda geração (2 G), surgiram novas vantagens dos SMES com tecnologia HTS, pois em comparação com os SMES com tecnologia LTS conseguem trabalhar a temperaturas mais elevadas (idealmente na ordem dos 50 K). Conseguem obter maiores densidades de fluxo magnético (até 20 T) e têm maiores eficiências.

Com o sucesso da produção de fios e fitas HTS prevê-se que haja mais produtores e consequentemente uma diminuição do custos dos mesmos, o que poderá levar a que os SMES com tecnologia HTS possam vir a ser dispositivos bastante atraentes no futuro [15].

2.3.2. Funcionamento e constituição de um sistema SMES

Os sistemas SMES armazenam energia no campo magnético de uma bobina supercondutora quando esta é percorrida por uma corrente contínua. A energia que é armazenada ($E_{armazenada}$) é dada pela equação dada em (2.4), onde L representa a Indutância da bobina, I representa a corrente presente na bobina [18]

$$E_{armazenada} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.4)$$

Um sistema SMES é constituído pelos seguintes sistemas principais:

Bobina supercondutora - É o elemento mais importante de todo o sistema SMES e deve ser projetada para minimizar a quantidade de material supercondutor para uma determinada energia magnética [19]. Contém um interruptor que comuta entre o modo de carga, descarga e persistente, sendo o interruptor implementado através de um conversor de eletrônica de potência, uma vez que a bobina deve estar inserida num sistema de criogenia, de modo a que se mantenha a mesma à temperatura requerida, e assim se encontre no estado supercondutor [5], [18], [20].

Existem dois tipos de topologias que são utilizadas nos SMES de acordo com as especificações que queremos obter, sendo que a topologia solenoidal tem uma estrutura mais simples e as forças eletromagnéticas são mais fáceis de manipular. Conseguem armazenar uma maior quantidade de energia [19]. Enquanto que a geometria toroidal tem outras vantagens, pois consegue apresentar uma menor dispersão do campo magnético e uma menor dimensão em relação à geometria solenoidal [5], [7].

Sistema de condicionamento de potência - Tem como função adaptar as grandezas provenientes da bobina com as grandezas da linha [5]. É constituído por um dispositivo bidirecional, através de um mecanismo de eletrônica de potência converte energia elétrica de corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC). Este processo acontece quando se carrega/descarrega a bobina supercondutora. Existem diversas topologias que podem ser usadas [18], [20].

Sistema de controlo - Este sistema tem como objetivo gerir as trocas de energia entre o SMES e a rede [5], [18]. Existem diversas técnicas de controlo que são possíveis de utilizar [18]. É de notar que o sistema de controlo também é responsável pelo controlo da criogenia [5].

Sendo que o diagrama geral de um SMES para uma ligação a uma rede trifásica [5], com os sistemas acima descritos é ilustrada pela Figura 2.8.

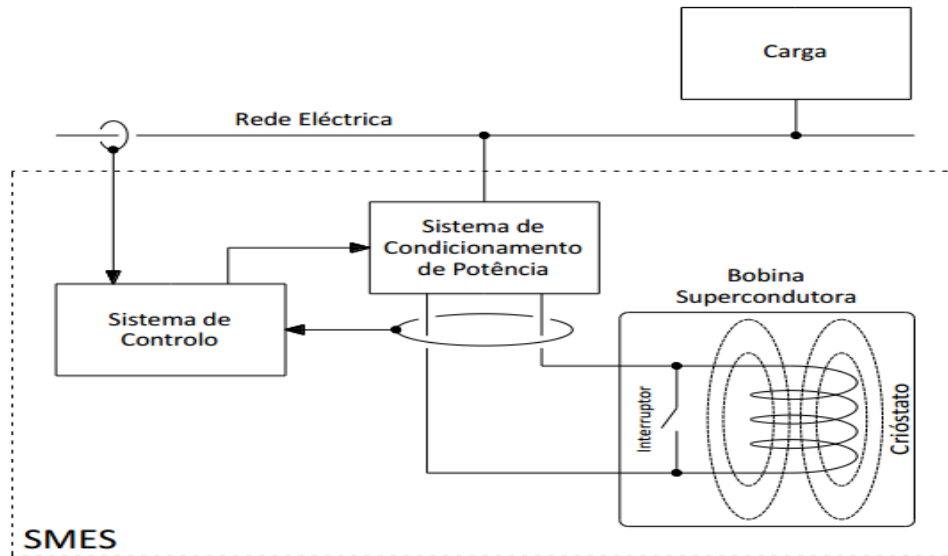


Figura 2.8 - Diagrama de um SMES ligada à rede, retirado de [5].

2.3.3. Modos de Funcionamento de um SMES

O modo de funcionamento da bobina supercondutora num sistema SMES está diretamente relacionado com o sistema de condicionamento de potência, como já foi referido anteriormente, pois é responsável por fazer a ligação da bobina supercondutora com a rede eléctrica. Pretende-se então um conversor bidirecional AC/DC [5], [21].

Os dois tipos de conversores mais utilizados são os seguintes: conversor de fonte de corrente (em [5] encontra-se uma descrição do funcionamento) e o conversor fonte de tensão com *chopper* que vai ser descrito posteriormente [18]. Existem ainda várias técnicas de controlo e outros tipos de conversores como os seguintes exemplos: um compensador estático síncrono (StatCom) inserido num SMES descrito em [21], Conversor bidirecional DC/DC de alta corrente descrito em [22], entre outros.

- **Conversor fonte de tensão com *chopper***

Este conversor pode-se dividir em dois subsistemas:

Conversor de fonte de tensão – É responsável pela interface entre a fonte de tensão gerada pelo condensador e o conversor *chopper* com a rede [23], [5]. Tem a capacidade de funcionar como conversor AC/DC bidirecional, e tem dois modos de operação:

Modo de inversão é utilizado quando existe uma falha na rede e é necessário injetar energia na rede [7].

Modo de retificação é quando não existem falhas na rede, carregando-se assim a bobina, mantendo esta no modo persistente [7], como posteriormente será descrito.

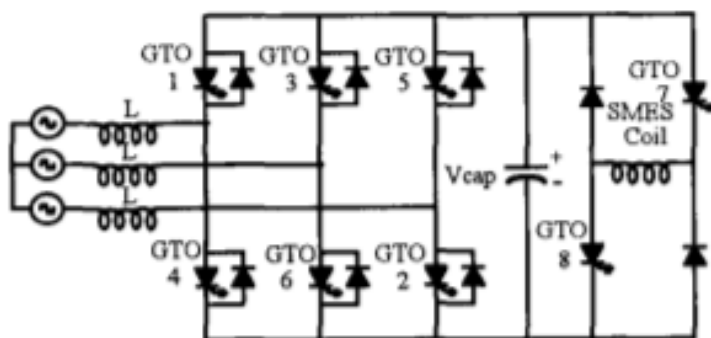


Figura 2.9 - Conversor em fonte de tensão com *chopper*, retirado de [23].

Conversor *chopper* - É o subsistema responsável por definir em que modo de funcionamento se encontra o SMES.

Na topologia representada na Figura 2.9 o *chopper* consiste em dois transístores GTOs e dois díodos [23]. É de notar que podem ser utilizados outros tipos de semicondutores dependendo da potência que é pretendida para o SMES, sendo que para baixa potência (na ordem dos KVA) o mais indicado seriam MOSFETs, para média potência (até às centenas de KVA) seria a utilização de IGBTs e para alta potência (na ordem dos MVA) os mais indicado serão os GTOs [5].

Este conversor tem a capacidade de trabalhar em três modos de operação diferente consoante a necessidade. Os modos de operação são os seguintes:

Modo de descarga - Nenhum dos transístores GTOs conduz, fazendo com que a corrente armazenada na bobina do SMES flua. Este modo é ativado quando é necessário a atuação do SMES [5], [7].

Modo de carga – Utiliza-se para carregar a bobina, isto é, ambos os transístores GTOs conduzem de modo a que a bobina carregue até esta atingir a sua capacidade máxima de armazenamento de corrente [5], [7].

Modo Persistente - Só um dos transístores GTO é que conduz [5], de maneira a criar um ciclo onde a corrente se mantenha.

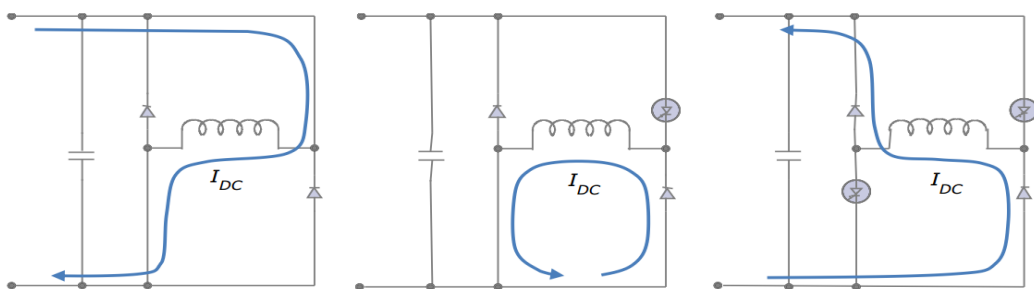


Figura 2.10 - A imagem da esquerda representa o modo de carga do SMES, a do meio o modo persistente e a imagem da direita o modo de descarga do SMES, retirado de [5].

2.3.4. Aplicações SMES

Os SMES são sistemas que podem ser adequados para diversas aplicações elétricas, pois possuem um conjunto de vantagens bastante apelativas [24].

Estes sistemas têm as seguintes características: capacidade de terem uma rápida carga/descarga (na ordem dos milissegundos), sendo esta uma das principais vantagens; uma grande eficiência (na ordem dos 95 %) [2]; grande durabilidade (possui uma vida útil bastante elevada em relação ao número de ciclos de carga/descarga), grande capacidade de resposta às necessidades da rede e tem pouco impacto ambiental [24], tornando assim os SMES um sistema de armazenamento de energia bastante apelativo.

As aplicações para os SMES foram propostas em todos os segmentos da rede de energia elétrica, ou seja, no sistema de geração, na rede de transporte, na rede de distribuição e nas instalações de utilização [24].

Devido à rápida resposta que os SMES possuem, estes tornam-se num sistema capaz de proporcionar bastantes benefícios para potenciais aplicações [8]. Sendo os seguintes pontos possíveis aplicações de um SMES [2]:

Estabilidade do sistema - Tem a capacidade de amortecer oscilações de potência de baixa frequência e de estabilizar os sistema de frequência [25].

Gestão em massa de energia - Uma aplicação possível para o sistemas SMES é a de atuar como um ponto de armazenamento e transferência para grandes quantidades de energia, podendo assim teoricamente reduzir os custos da eletricidade [25].

Estabilidade de tensão dinâmica - O principal motivo da existência de instabilidade de tensão dinâmica é devido à incapacidade que um sistema tem em dar resposta às necessidades de energia reativa [26], os SMES revelaram ser sistemas capazes de mitigar a instabilidade de tensão dinâmica fornecendo potência ativa e reativa simultaneamente [2], [27].

Melhoria da qualidade da energia - Estes sistemas conseguem suavizar as perturbações em sistemas de potência, os SMES têm uma resposta muito rápida (na ordem dos *ms*), conseguindo assim evitar interrupções de energia [2], [24], [28].

Fontes ininterruptas de energia - Devido à elevada capacidade de energia que estes sistemas dispõem, estudos revelaram que estes podem ser dimensionados para funcionarem como fontes ininterruptas de energia [2], [28]. Os SMES conseguem manter um fornecimento de energia estável durante o arranque de grupos de emergência ou de outros sistemas de armazenamento de energia [18], [29].

Canhão eletromagnético - Este tipo de canhão eletromagnético requer pulsos de alta potência, sendo os SMES um sistema de armazenamento de energia bastante interessante para esta aplicação [19].

Estabilização do gerador de energia eólica - Os geradores de energia eólica sofrem de problemas de estabilidade transitória durante os distúrbios da rede. Através de um sistema SMES é possível controlar simultaneamente tanto a potência ativa como a potência reativa, tornando os SMES como um bom sistema de estabilização para estes geradores [2].

Minimização das variações de energia e tensão num gerador de energia eólica - Devido às variações aleatórias da velocidade do vento, a potência de saída e tensão do gerador variam. Como já foi referido os sistemas SMES conseguem controlar simultaneamente a potência ativa e reativa. Estes sistemas podem ser indicados para reduzir as variações de tensão e potência de um gerador de energia eólica [2].

- **Aplicação dos SMES para uma melhor qualidade da energia**

De acordo com o tema deste trabalho é necessário dar ênfase às potenciais vantagens da aplicação de um SMES para o melhoramento da QEE. Estes sistemas têm a capacidade de conseguir suavizar as perturbações em sistemas de potência, sem interrupções, em cargas sensíveis [2]. Quando existem distúrbios momentâneos, existindo falhas nas linhas de transmissão ou quando a tensão baixa consideravelmente, estes dispositivos têm uma resposta muito rápida conseguindo injetar potência num intervalo de tempo muito curto (milissegundos a segundos), evitando assim que exista uma interrupção de energia [5], [23].

Alguns dos problemas da qualidade de energia podem ser reduzidos através dos SMES [5]:

Cavas de tensão: são caracterizadas por existir diminuição brusca do valor eficaz da tensão de alimentação para um valor entre 90% e 1% da tensão nominal [1], durante meio ciclo a um minuto, seguida do seu restabelecimento [5], [30].

Sobretensões breves: são caracterizadas por um aumento significativo da tensão da rede [1], entre 110 a 180% do valor nominal durante meio ciclo a um minuto [5].

Transitórios: variações uni ou bidirecionais na tensão e/ou corrente da linha [5], [30].

Interrupções da alimentação: Este conceito varia e não é unânime. Através da norma NP EN 50160:2001, são consideradas interrupções de alimentação as situações cuja tensão no ponto de entrega é inferior a 1% da tensão declarada. No entanto, segundo a *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) a definição é diferente [1], sendo considerada a interrupção de alimentação, reduções a menos de 10% dos valores nominais da tensão [5], [30].

Flutuações de tensão: podem ser definidas como variações cíclicas da tensão, ou como séries de variações relativamente rápidas e aleatórias. São variações inferiores a 5% do valor nominal da tensão da rede [5], [30].

Desequilíbrios de tensão: variações na amplitude das tensões trifásicas [5].

Distorção harmónica: as harmónicas são tensões ou correntes sinusoidais com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental (50 Hz). Esta distorção harmónica aparece devido à presença de cargas não lineares ligadas à rede eléctrica [1].

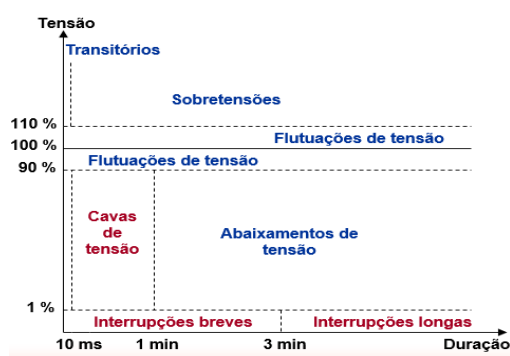


Figura 2.11 - Perturbações de QEE, retirado de [31].

Na Figura 2.12 está representado a relação entre a potência/energia por unidade de massa para os sistemas SMES em comparação com outras tecnologias existentes.

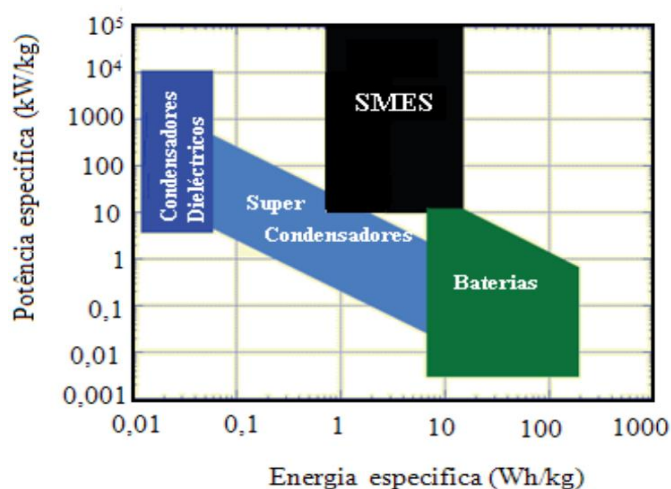


Figura 2.12 - Relação entre a potência/energia em unidade de massa, em diferentes tecnologias, adaptado de [19].

2.3.5. Projetos SMES com tecnologia HTS

Como já foi referido anteriormente com o aparecimento dos supercondutores de alta temperatura e com o desenvolvimento de fita HTS, surgiram investigações da utilidade desta tecnologia nos SMES. Ao longo dos últimos anos desenvolveram-se vários projetos que contêm tecnologia HTS. Neste trabalho serão analisados alguns desses projetos realizados por diversos consórcios e grupos de investigação.

No Japão o consórcio da *TOSHIBA Corporation & Chubu E. Power* desenvolveu um SMES com tecnologia HTS, cuja aplicação seria mitigar o problema das quedas de tensão instantâneas.

O desenvolvimento do SMES foi realizado através de um cabo Bi-2212, pois este possui características condutoras bastante elevadas a baixas temperaturas num campo magnético alto [32]. Neste projeto o sistema de bobinas com tecnologia HTS foi evoluindo, começando inicialmente com quatro unidades até chegar às dezoito unidades de bobinas empilhadas. Sendo a geometria do magneto solenoidal, o sistema SMES foi projetado para fornecer uma potência de 1 MVA e uma energia armazenada de 1 MJ [33].

Através dos testes realizados ficou demonstrado que o sistema SMES HTS consegue responder de forma eficaz quando ocorre um queda de tensão instantânea [33]. Foram também realizados testes ao comportamento da temperatura do SMES quando este está perante a repetitiva operação do modo de carga e descarga, de forma a avaliar o aumento da temperatura das bobinas do SMES, ficando demonstrada a capacidade e a eficácia que estes sistemas possuem em dar respostas a este tipos de problemas que possam existir na rede elétrica [33].

Em França, no projeto da DGA (*Délégation Générale pour l'Armement*) foi desenvolvido um sistema SMES com tecnologia HTS com 800 KJ, em que a sua aplicação seria funcionar com uma fonte pulsada de alta potência [34]. Uma das muitas aplicações que estes sistemas podem ter são os canhões eletromagnéticos [19]. As conclusões retiradas deste projeto são que os SMES com tecnologia HTS se revelaram bastante interessantes como fontes de potência pulsada [34].

Na China, o projeto desenvolvido pela *Chinese Academy of Sciences*, teve no seu início o projeto e testes de um SMES de 1 MJ com tecnologia HTS, para este ser implementado numa subestação de 10,5 kV [35], [36]. Este projeto foi inovador por se tratar da primeira subestação mundial desenvolvida através de tecnologia HTS. Não só o SMES foi desenvolvido através de HTS, também o transformador, os cabos bem como o limitador de corrente de falhas, foram desenvolvidos através de HTS, tornando este projeto único no mundo, este projeto está descrito pormenorizadamente em [37].



Figura 2.13 - À esquerda está a primeira subestação mundial com tecnologia HTS, imagem retirada de [37], à direita está o SMES HTS usada no projeto da primeira subestação mundial, imagem retirada de [35].

Nos Estado Unidos da América foi desenvolvido um projeto de grandes dimensões de um SMES com tecnologia HTS. Procedeu-se ao projeto, construção e realização de testes experimentais. É de realçar este projeto devido às suas elevadas dimensões, não só à grande capacidade de armazenamento de energia 1,7 MJ, mas também devido ao facto de nos testes experimentais terem sido alcançados valores assinaláveis como é o caso de 12,5 T de valor máximo do campo a uma temperatura de 27 K, sendo esta a primeira vez que estes resultados se verificaram para temperaturas acima dos 10 K [38].

A *Huazhong University of Science and Technology* desenvolveu um projeto distinto dos anteriores, pois consistiu no desenvolvimento de um sistema SMES com tecnologia HTS portátil, algo que é considerado inovador, sendo este sistema inserido num contentor como ilustra a Figura 2.13. A capacidade de armazenamento de energia é de 150 KJ e um valor de potência de 100 KW, a geometria do magneto é solenoidal e tem a particularidade de ser constituído por dois tipos de fita HTS (BSSCO e YBCO), operando este à temperatura de 20 K [39].



Figura 2.14 - Visão geral do contêntor que contem o sistema SMES portátil, retirado de [39].

Na Tabela 2.1 estão descritos os vários projetos analisados anteriormente, as aplicações dos mesmos, bem como um conjunto de informações que podem ser consideradas relevantes.

<i>Projeto</i>	<i>País</i>	<i>Potência/Energia</i>	<i>SAT</i>	<i>Geometria do Magneto e dimensões</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Observações</i>	<i>Referências</i>
ARPA-E	EUA	1,7 MJ	(RE)BCO	Toroidal, 44 panquecas (28 no interior, 16 no exterior). Diâmetro exterior da bobina ≈ 300mm	SMES para testes experimentais para abertura de campos elevados.	Máximo do. Campo → 25 T Corrente → 720 A Indutância → 7 H Temperatura → 4 K	[38]
CNRS-Institut Néel	França	800 KJ	Bi-2212	Solenoidal, 26 panquecas. Diâmetro exterior da bobina ≈ 814 mm. Altura da bobina ≈ 222mm	SMES para cânono eletromagnético.	Máximo do Campo → 5,2 T Corrente → 315 A Temperatura → 20 K	[34]
Chinese Academy of Sciences	China	500 KVA/1 MJ	Bi-2223	Solenoidal, 44 panquecas duplas. Diâmetro exterior da bobina ≈ 568 mm. Altura da bobina ≈ 648 mm	SMES inserida numa subestação de 10 KV.	Máximo do Campo → 5,72 T Corrente → 560 A Indutância → 6,28 H Temperatura → 4,2 K	[35]–[37]

<i>TOSHIBA corporation & Chubu E. Power</i>	Japão	1 MVA/1MJ	Bi-2212	Solenoidal, 18 panquecas empilhadas. Diâmetro exterior da bobina≈ 570mm. Altura da bobina≈ 554 mm	SMES para reduzir quedas de tensão instantâneas.	Corrente→ 500 A Indutância→ 7,87 H Temperatura→ 5 K	[32], [33]
<i>Huazhong University of Science and Technology</i>	China	150 KJ	YBCO- Nas bobinas entre a 7 e a 11. BSCCO –Bobinas 1 a 6 e de 12 a 17.	Solenoidal, 17 panquecas duplas. Diâmetro exterior da bobina≈ 396 mm	SMES portátil com potencial para diversas aplicações.	Máximo do Campo→ 4,7 T Corrente→ 183 A Indutância→ 9,7 H Temperatura→ 20 K	[39]

Tabela 2.1 - Projetos SMES HTS

2.3.6. Projetos implementados de sistemas SMES para a melhoria da qualidade da energia elétrica (QEE)

Como já foi referido anteriormente, os sistemas SMES podem atuar de modo a melhorar QEE devido às suas características que estes possuem, já referidas anteriormente. Embora existam alguns estudos, são ainda poucos os projetos implementados com o sistema SMES de modo a analisar a influência destes sistemas na melhoria da qualidade da energia elétrica (QEE). No entanto, existem dois projetos desenvolvidos que merecem ser analisados com particular destaque, por estudarem a influência que os sistemas SMES podem ter na melhoria da QEE.

A Korea Electrotechnology Research Institute (KERI) desenvolveu um sistema SMES com 3 MJ com o objetivo deste sistema proteger as cargas sensíveis num sistema de energia, este sistema está projetado para atuar quando existir uma falha/interrupção no fornecimento de energia ou quando ocorrer uma brusca queda de tensão, de modo a proteger o equipamento, evitando assim que este se vá gradualmente deteriorando ou até mesmo evitando que diversas máquinas e equipamentos sensíveis a este tipo de problemas se danifiquem.

Derivado às características que os sistemas SMES possuem, como as de terem uma grande longevidade (devido ao facto do magneto não se deteriorar) e de possuírem uma rápida resposta [40], são fatores relevantes que pode levar a se optar por estes sistemas em prol de outros, de forma a se conseguir melhorar a QEE. Neste projeto é perceptível como um sistema SMES pode intervir em dois problemas que são considerados problemas de qualidade de energia elétrica: as interrupções de alimentação e as cavas de tensão.

No projeto da Chinese Academy of Sciences em que se desenvolveu um SMES 1 MJ integrado numa subestação, como está referido na Tabela 2.1. São claros os efeitos positivos que estes sistemas podem trazer para a melhoria da qualidade da energia elétrica. Os resultados obtidos foram bastante positivos com a utilização de um sistema SMES, pois conseguiu-se reduzir o valor da distorção harmónica de tensão de cerca de 5% para um valor abaixo do 1%. O valor da distorção harmónica de corrente passou de aproximadamente 5,13% para cerca de 1,33%. Estes resultados promissores demonstram o potencial que estes sistemas têm na melhoria da QEE. É de realçar que o valor do fator de potência foi melhorado para 0,99, ou seja, uma expressão que se revela muito próximo do valor ideal de 1 [37].

Existem vários outros estudos que visam aplicar os sistemas SMES para melhorar questões relacionadas com a melhoria da QEE como na redução de harmónicas, na estabilização de frequência, na influência dos SMES e na melhoria da QEE dos geradores eólicos.

2.3.7. Integração de sistemas SMES na melhoria da qualidade da energia elétrica em sistemas de geração eólica

Verificou-se um rápido aumento de sistemas de geração eólica nos últimos anos, principalmente de parques eólicos. É esperado que no futuro sistemas dispersos de geração de energia eólica sejam cada vez mais utilizados. No entanto, serão necessários existir avanços com os sistemas de controlo da energia eólica, de forma a que a geração de energia através de sistemas eólicos consiga ganhar terreno à dependência de combustíveis fósseis [41], [42].

Todavia, se um elevado número de sistemas de geração eólica estiver ligado à rede podem causar problemas na QEE. De modo a que se possa suavizar ou até mesmo resolver integralmente esses problemas causados pela produção de energia através de sistemas de geração eólica, a integração de sistemas SMES pode-se relevar uma tecnologia importante, pois através da inclusão destes sistemas é possível conseguir-se suavizar a saída do gerador eólico e até mesmo compensar pequenos distúrbios.

Devido às particulares características que estes sistemas possuem, já anteriormente enunciadas, e derivado às diversas potencialidades dos sistemas SMES, estes podem tornar-se numa tecnologia chave para resolver problemas associados à integração de sistemas eólicos na rede, como oscilações de frequência e de tensão [42].

A energia armazenada nos sistemas SMES permite que exista uma troca de potência ativa durante pequenos períodos, na ordem dos poucos segundos, sendo então possível utilizar-se estes sistemas para regular o fluxo de energia à saída de um parque eólico [43].

Existem projetos que estudam os benefícios da integração de SMES em parques eólicos, e dessa forma foi possível verificar que a integração destes sistemas trazem benefícios, pois têm a capacidade de ajudar a melhorar o controlo e a estabilização da potência ativa, acabando assim por contribuir para uma melhoria global no sistema de desempenho [43].

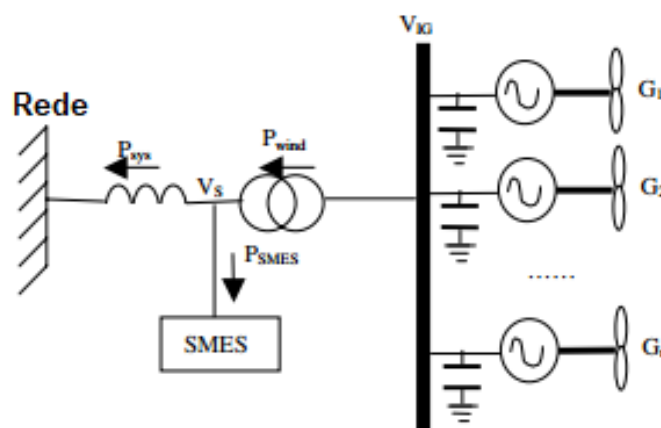


Figura 2.15 - Representação do modelo do parque eólico com SMES, adaptado de [43].

2.4. Filtros harmónicos para melhorar a qualidade da energia elétrica

Algumas das soluções utilizadas para resolver problemas relacionados com a rede elétrica passam pelo desenvolvimento e utilização de filtros, sendo esta uma forma convencional de melhorar a qualidade da energia elétrica (QEE). Os filtros que merecem maior relevância são os seguintes:

- **Filtros Passivos**

Como o próprio nome indica estes filtros são somente constituídos por elementos passivos: condensadores, bobinas e resistências. Estes filtros acabam por ser uma solução não muito dispendiosa e de fácil dimensionamento, no entanto têm pouca flexibilidade devido ao facto de só serem projetados para filtrarem um determinado espectro harmónico [44].

Os filtros série passam por uma ligação em série com a carga de um condensador e de uma bobina, estando estes em paralelo entre si. Estes filtros têm como objetivo aumentar a impedância à circulação de correntes harmónicas, no entanto mantêm baixa a impedância à circulação da componente fundamental (50 Hz) [1].

Os filtros paralelos passam pela ligação em paralelo com a carga de uma bobina e de um condensador em série, com o objetivo de obter um circuito de baixa impedância para as componentes harmónicas da corrente, de modo a evitar que estas circulem na rede. Uma das vantagens destes filtros é terem um custo reduzido em relação aos filtros série, consequentemente estes são mais utilizados.

O maior custo dos filtros série é devido ao facto de estes serem dimensionados para a corrente de carga, enquanto que os filtros paralelo são apenas projetados para eliminar as componentes harmónicas desejadas, sendo que é necessário ter um maior cuidado, pois ocorre o risco de ressonância [1].

Os filtros passivos são projetados apenas para atenuarem uma determinada componente harmónica. Devido a esta limitação, deve-se antes da instalação de um filtro passivo, ser identificadas as componentes harmónicas que se pretendem eliminar [1].

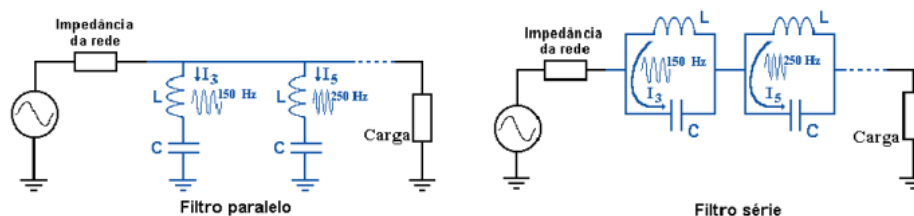


Figura 2.16 - Filtros passivos de harmónicas, retirado [1].

- **Filtros Ativos**

À semelhança dos filtros passivos os filtros ativos podem ser ligados em série ou em paralelo. Tal como nos filtros passivos também nos filtros ativos a ligação em série implica que sejam dimensionados para suportarem a corrente de carga, enquanto que na ligação paralelo os filtros apenas são dimensionados para as harmónicas de corrente. Por este motivo a ligação em paralelo é a mais utilizada.

Os filtros ativos ligados em paralelo possuem uma unidade de monitorização contínua da distorção harmónica de corrente, sendo que esta unidade controla um gerador da corrente harmónica injetada no circuito. Através da geração de correntes de carga no filtro ativo, a sua circulação na rede é anulada [1].

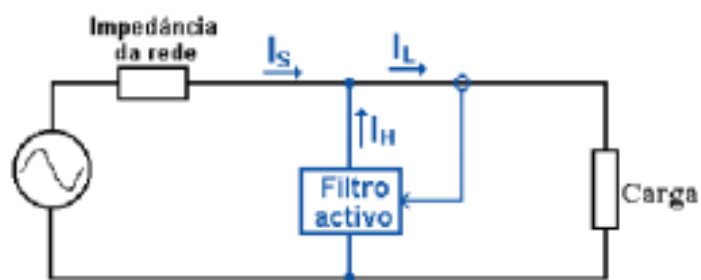


Figura 2.17 - Filtro ativo simplificado ligado em paralelo, retirado de [1].

A Figura 2.18 representa as formas de onda e os respetivos espectros harmónicos das correntes. Sendo que o I_s representa a corrente de alimentação, I_L a corrente de carga e I_H a corrente gerada pelo filtro ativo.

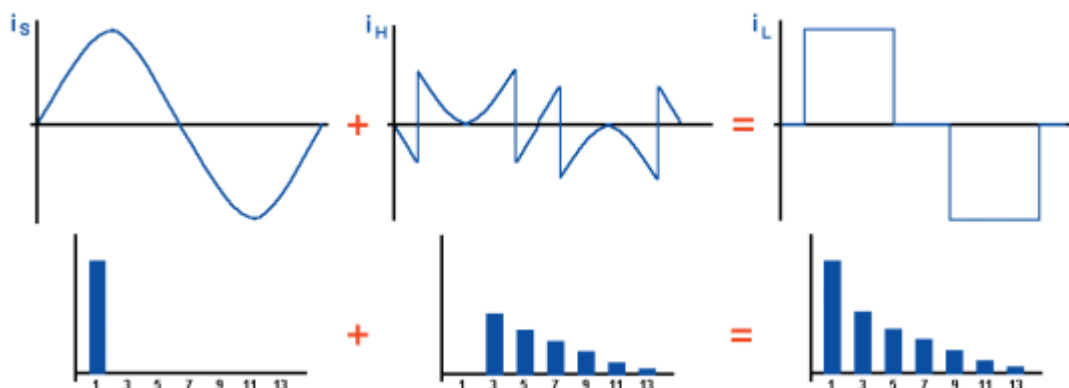


Figura 2.18 - Formas de onda e respetivos espectros harmónicos, retirado de [1].

- **Filtros híbridos**

Por vezes pode ser mais vantajoso economicamente optar por filtros híbridos. Estes são a conjugação entre os filtros ativos e passivos, sendo que a componente passiva tem como objetivo filtrar as

componentes harmónicas com maior amplitude, enquanto que a componente ativa do filtro normalmente fica responsável pelas restantes componentes harmónicas de corrente a eliminar [1].

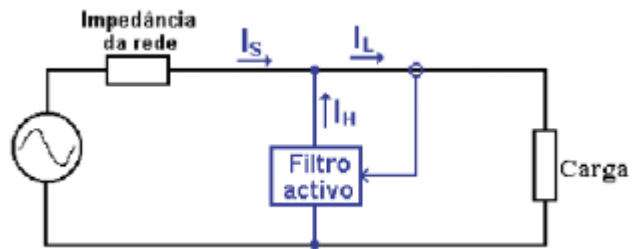


Figura 2.19 - Exemplo de um filtro híbrido, retirado de [1].

2.5. Síntese do capítulo

Neste capítulo foram abordadas matérias que serão relevantes para a realização desta dissertação, de modo a compreender os temas em que este trabalho irá incidir.

Iniciou-se com a abordagem ao conceito da supercondutividade, passando pela análise feita às suas características. Foram abordados os materiais LTS e os materiais HTS, sendo que estes últimos passaram por um maior estudo, pois vão ao encontro do trabalho proposto para a elaboração desta dissertação.

Na segunda parte deste capítulo foi abordado o tema dos SMES, analisando as diferentes tecnologias de possível utilização (tecnologia HTS ou LTS), o seu funcionamento e as diversas aplicações possíveis, com especial destaque para utilização de SMES para a melhoria da qualidade da energia. Foram também analisados alguns projetos implementados de SMES com tecnologia HTS.

Em suma, foram abordados dois temas principais: a supercondutividade e os sistemas SMES, pois são aqueles que se apresentam como matéria relevante para a realização desta dissertação.

3. Caracterização da instalação alvo

3.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se a caracterização da instalação alvo. É realizada uma recolha de dados através de um analisador de energia elétrica ligado ao gerador eólico presente no departamento de Electrotécnica e de Computadores da Universidade Nova de Lisboa da Faculdade de Ciências e Tecnologias.

As medições apresentadas permitirão, de futuro, dimensionar uma SMES para resolver os problemas de qualidade de energia que resultam da ligação do gerador eólico à rede. Este trabalho, contudo, sai fora do âmbito da presente dissertação.

3.2. Gerador eólico

O departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, possui um gerador eólico no terraço do edifício, sendo este da empresa Yangzhou Shenzhou Wind-Driven Generator, modelo FD3.6-2000-10L. O gerador eólico está ligado a um retificador/inversor.



Figura 3.1 - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores com o gerador eólica na parte superior do edifício.

As características do gerador eólico em análise estão presentes na seguinte tabela:

Potência nominal (W)	2000
Tensão nominal (V)	120
Diâmetro das pás do rotor (m)	3,2
Velocidade do vento de arranque (m/s)	3,2
Velocidade do vento nominal (m/s)	9
Velocidade do vento de segurança (m/s)	16
Rotação das pás nominal (rpm)	400
Gerador	Alternador de Magnetos Permanentes
Material das pás	Fibra de Vidro
Número de pás	3

Tabela 3.1- Especificações do gerador eólico em análise [45].

3.2.1. Análise de dados recolhidos

A primeira fase deste capítulo passou por uma recolha de dados ao longo de cerca de seis dias, através de um analisador de energia que adquiria os dados do gerador eólico à saída do inversor, sendo que a análise feita é monofásica. O analisador de energia retirou os dados de minuto a minuto, de modo a obter dados que possam revelar-se importantes sobre a qualidade da energia elétrica (QEE).

É de notar que as medições efetuadas pelo analisador de energia foram em duas situações distintas. Uma primeira medição com duração entre o dia 27/03/2018 e dia 02/04/2018, de minuto a minuto, tendo-se obtido 8639 medições. E uma segunda medição efetuada dia 06/09/2018, onde se retiraram novos dados de modo a obter mais informação sobre a instalação.

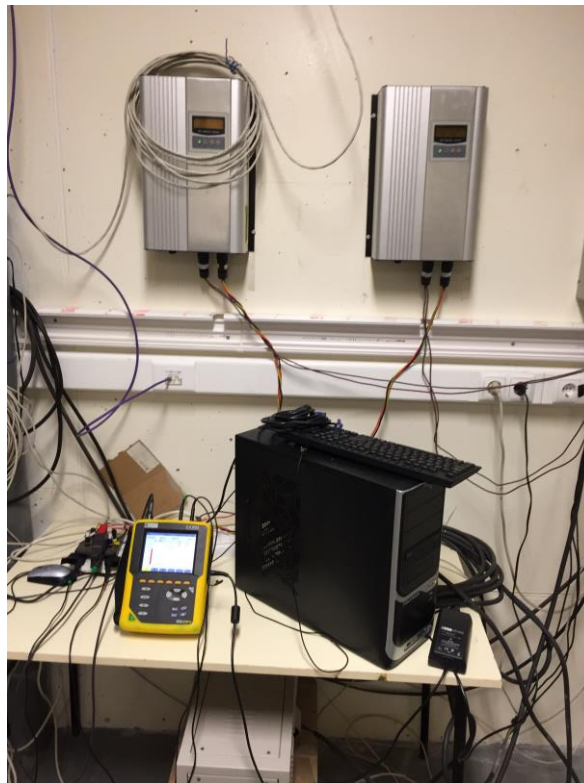


Figura 3.2 - Inversores do gerador eólico com o analisador de energia a efetuar medições.

- **Taxa de Distorção Harmónica (THD)**

A distorção harmónica é um aspeto bastante relevante na análise da QEE. O constante aumento da utilização de componentes eletrónicos, que apresentam um comportamento não-linear, provocam perturbações significativas na forma de onda de corrente e de tensão, dando origem a perdas de potência adicional. Pode-se dizer que as harmónicas são correntes ou tensões sinusoidais com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental (50 Hz) [1].

A taxa de distorção harmónica (THD) foi a solução encontrada de modo a quantificar-se a distorção harmónica, sendo um dos indicadores da Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{kef}^2}}{I_{1ef}} \times 100 \quad (3.1)$$

A expressão definida em (3.1) é relativa à taxa de distorção harmónica de corrente (THD_I). Esta definição é similar para a taxa de distorção harmónica de tensão (THD_V) dada em (3.2). É de notar que no caso em análise esta não vai ser relevante, pois a tensão é fornecida pela rede.

$$THD_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{kef}^2}}{V_{1ef}} \times 100 \quad (3.2)$$

O gráfico dado pela Figura 3.3 analisa a variação da taxa de distorção harmónica de corrente (THD_I), entre o dia 27/03/2018 e o dia 02/04/2018.

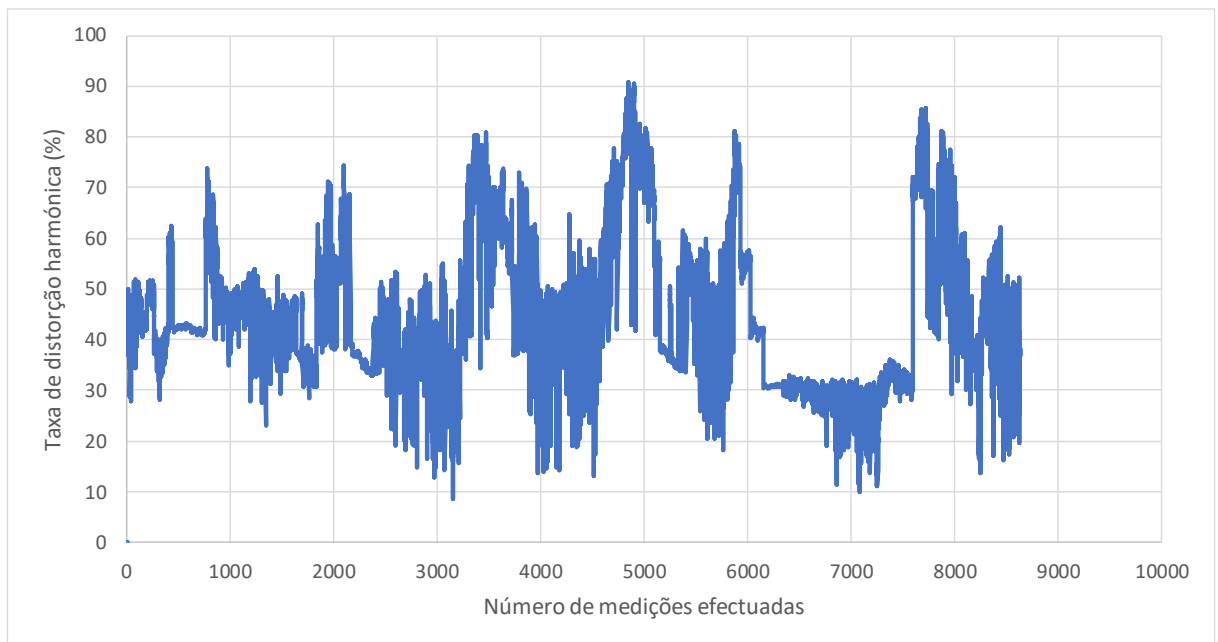


Figura 3.3 - Gráfico relativo à variação da THD_I entre o dia 27/03/2018 e 02/04/2018 do gerador eólico à saída do inversor.

Isolando a componente fundamental da corrente (I_{1ef}) presente na expressão (3.3), é possível calcular ao longo das medições efetuadas o valor da mesma. Na Figura 3.4 está representado em gráfico a variação da componente fundamental da corrente (I_{1ef}) ao longo de cada medição efetuada pelo analisador de energia. Deduzindo a expressão dada em (3.3) de modo a se isolar a componente fundamental da corrente (I_{1ef}) obtém-se a expressão (3.4).

$$THD_i(\%) = \sqrt{\frac{I_{ef}^2 - I_{1ef}^2}{I_{ef}^2}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$I_{1ef} = \sqrt{I_{ef}^2 - \frac{THD_i^2 \times I_{ef}^2}{100^2}} \quad (3.4)$$

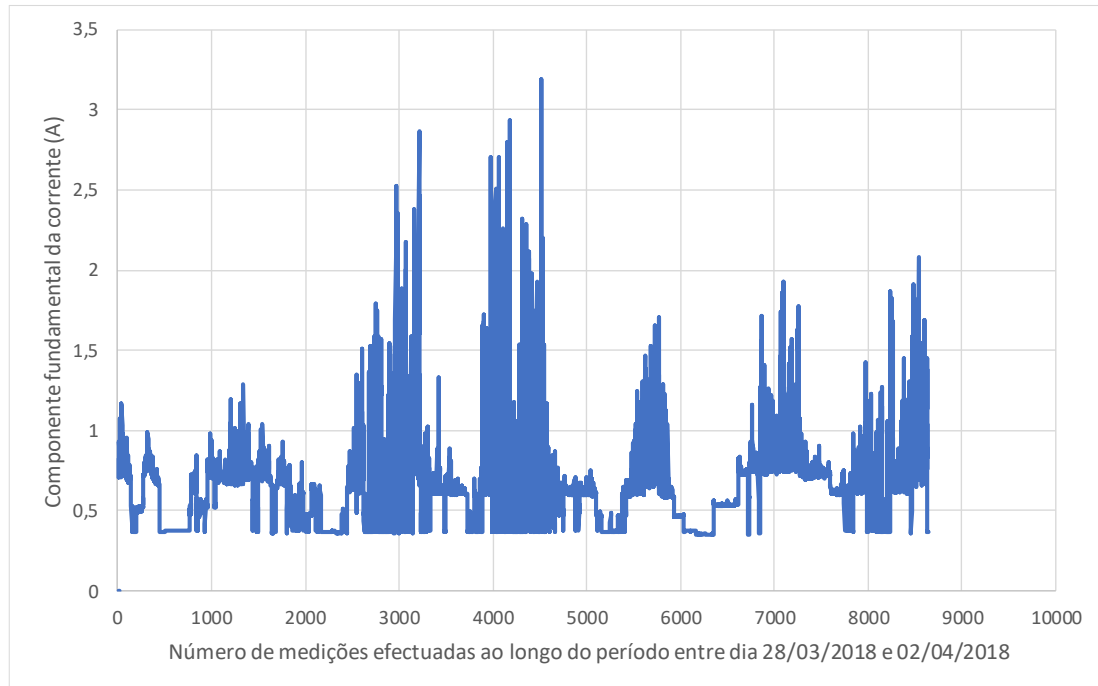


Figura 3.4 - Gráfico referente à variação do valor da componente fundamental da harmónica de corrente.

O valor máximo obtido da componente fundamental é de $I_{1ef} = 3,19$ A, enquanto que o valor mínimo obtido ao longo do período de medições foi de $I_{1ef} = 0,35$ A.

Na Figura 3.5 está representado o espetro de harmónicas de corrente retirado pelo analisar de energia no dia 06/09/2018, com 41,5% de taxa de distorção harmónica de corrente (THD_I), sendo ideal o valor nulo. É de notar que o valor obtido é instantâneo, não sendo este um valor constante.

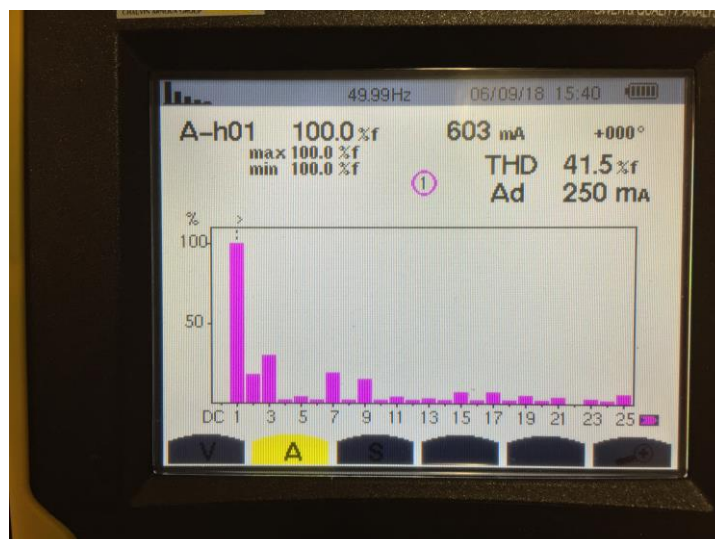


Figura 3.5 - Espectro de harmônicas de corrente e respetiva taxa de distorção harmónica de corrente.

Na Figura 3.6 está representada a análise efetuada à saída do inversor da forma de tensão. Como seria expetável é uma sinusóide perfeita, pois a tensão é fornecida pela rede. Enquanto que a forma de onda de corrente apresenta bastante distorção, com um valor de 662 mA, sendo que este é um valor instantâneo, para as 15h:40 min do dia 06/09/2018. No entanto, é perceptível que a forma de onda de corrente apresenta este comportamento de uma forma regular, bem como a de tensão.

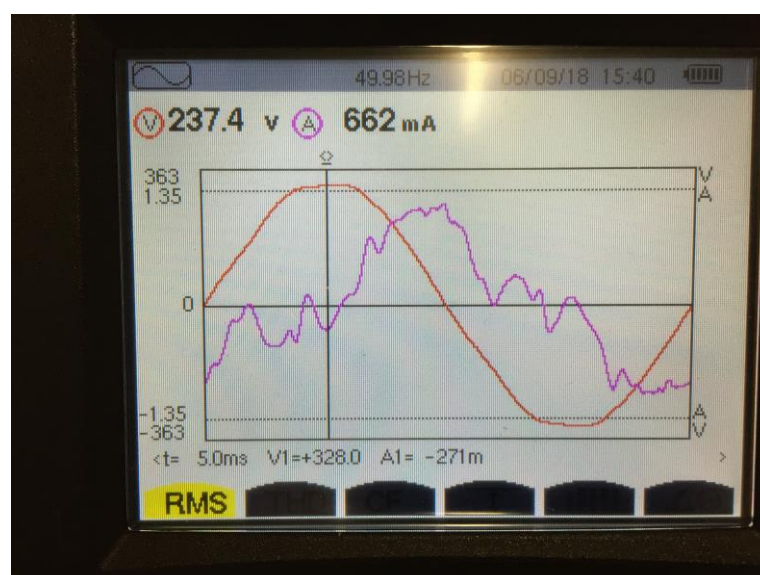


Figura 3.6 - Forma de onda de corrente e de tensão.

3.3. *Síntese do Capítulo*

Neste capítulo foi abordada a caracterização da instalação alvo, ou seja, realizou-se a caracterização de um potencial estudo de caso para um projeto futuro.

É realizada uma análise dos dados do gerador eólico presente no departamento de engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Os dados foram recolhidos através de um analisador de energia.

4. Contributo para o projeto de SMES

4.1. Introdução

Neste capítulo, está presente o contributo que esta dissertação pretende dar, seja numa primeira fase ao adicionar novas capacidades a um algoritmo desenvolvido em MATLAB, que tem como função dimensionar a bobina supercondutora HTS de um sistema SMES, bem como, numa fase posterior, a validação dos resultados obtidos, num software de elementos finitos COMSOL Multiphysics. Nesse mesmo programa de elementos finitos são ainda realizados diversos testes de modo a que se possa exercer uma comparação para avaliar a topologia solenoidal e toroidal, usando as mesmas características para as duas topologias.

4.2. Algoritmo para dimensionamento da bobina supercondutora para um sistema SMES

O algoritmo desenvolvido tem como base um outro anterior desenvolvido por [46], em que se pretende adicionar novas competências e funcionalidades. Princípios como maximizar a quantidade de energia armazenada através do mínimo volume da bobina HTS continua a ser uma prioridade. O algoritmo desenvolvido é implementado por um método analítico baseado em fórmulas clássicas para o dimensionamento de bobinas com núcleo de ar em panquecas.

A energia armazenada por uma bobina é dada pela expressão (4.1), onde L_{total} representa a indutância total da bobina e I representa a corrente.

$$E = \frac{1}{2} \times L_{total} \times I^2 \quad (4.1)$$

Considerando uma bobina em panqueca, temos a seguinte representação:

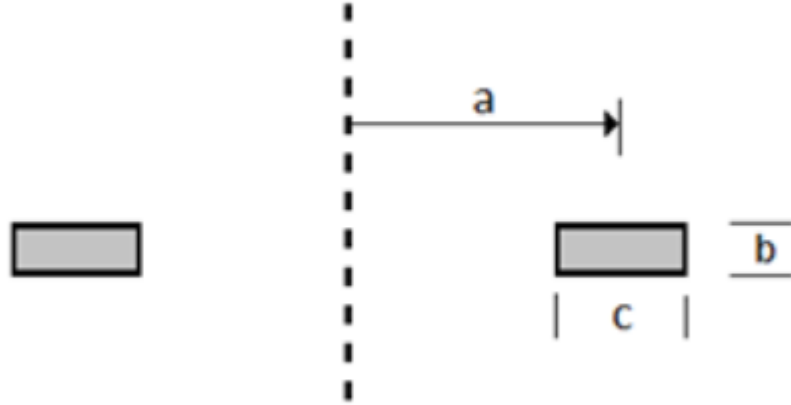


Figura 4.1 - Representação das dimensões de uma bobina em panqueca onde (a) representa o raio médio, (b) altura e (c) a largura total da fita, retirado de [46].

No algoritmo desenvolvido foi utilizada a expressão em (4.2), fórmula de *Weinstein* para efetuar o cálculo da indutância L_{total} (em mH) de uma bobina [47].

$$L_{total} = 4\pi a N^2 (\lambda + \mu) \quad (4.2)$$

Onde a variável N representa o número de espiras da bobina e as variáveis λ e μ sendo duas constantes obtidas pelas seguintes expressões:

$$\lambda = \log\left(\frac{8a}{c}\right) + \frac{1}{12} - \frac{\pi x}{3} - \frac{\log(1+x^2)}{2} + \frac{\log(1+x^2)}{12x^2} + \frac{x^2 \log\left(1 + \frac{1}{x^2}\right)}{12} + \frac{2}{3}\left(x - \frac{1}{x}\right) \tan^{-1}x \quad (4.3)$$

$$\mu = \frac{c^2}{96a^2} \left\{ \left[\log\left(\frac{8a}{c}\right) - \frac{\log(1+x^2)}{2} \right] (1 + 3x^2) + 3.45x^2 + \frac{221}{60} - 1.6\pi x^3 + 3.2x^3 \tan^{-1}x \right. \\ \left. - \frac{\log(1+x^2)}{10x^2} + \frac{x^4 \log\left(1 + \frac{1}{x^2}\right)}{2} \right\} \quad (4.4)$$

O valor da variável x é obtida através de (4.5).

$$x = \frac{b}{c} \quad (4.5)$$

O número de espiras calculado pelo algoritmo é feito através da expressão dada em (4.6), onde esp é a espessura da fita supercondutora, R_i é o raio interno, e l é o comprimento total da fita supercondutora. É de notar que o fator de empacotamento é considerado como sendo um, isto é, não existe qualquer intervalo entre duas voltas sucessivas [46].

$$N = \frac{\pi(esp - 2R_i) + \sqrt{(\pi(2R_i - esp))^2 - 4\pi \times esp \times l}}{2\pi \times esp} \quad (4.6)$$

No algoritmo desenvolvido pretende-se saber as dimensões necessárias para construir a bobina supercondutora. Tendo apenas como dados de entrada as características da fita supercondutora e os valores que o utilizador pretende obter de energia armazenada, e consequentemente da indutância total que se obtém através das especificações.

Quando se tem mais do que uma bobina, de modo a se conseguir obter o valor de indutância total do sistema é necessário efetuar os cálculos da indutância mútua. A indutância mútua numa configuração solenoidal com duas bobinas concêntricas, é dada pela expressão (4.7) [48], onde N_1 e N_2 são o número de espiras de cada bobina, μ_0 é a permeabilidade magnética do vazio, os restantes parâmetros da expressão são representados na Figura 4.2 (em metros), em que R_1 e R_2 são respetivamente o raio mínimo e o raio máximo da primeira bobina e R_3 e R_4 respetivamente o raio mínimo e o raio máximo da segunda bobina, sendo g a distância média entre as bobinas [48].

$$L_m = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)} \times \int_0^\pi \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_3}^{R_4} \frac{\cos(\theta) r_1 r_2}{\sqrt{g^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\theta)}} dr_1 dr_2 d\theta \quad (4.7)$$

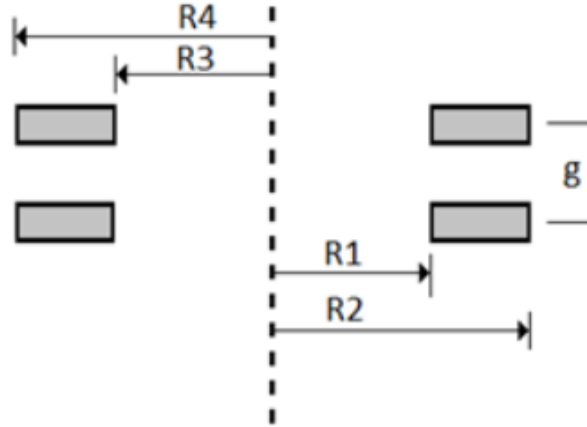


Figura 4.2 - Representação das dimensões de duas bobinas concêntricas, retirado de [46].

Para se efetuar o cálculo da indutância total quando são definidas mais do que duas bobinas, e estas são iguais, é necessário calcular as contribuições de cada par de bobinas. Esses cálculos são dados pela equação descrita em (4.8).

$$L_{total} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L_{ij} \quad (4.8)$$

Sendo que N é o nº de bobinas ligadas em série, o L_{ii} é a auto-indutância da enésima bobina i e em que $L_{ij} = L_{ji}$ é a indutância mútua entre a enésima bobina i e a enésima bobina j .

O algoritmo desenvolvido em MATLAB tem como base as equações descritas de (4.1) a (4.8), e são cálculos fundamentais para todo o desenvolvimento do algoritmo. O algoritmo desenvolvido nesta dissertação tem três novas competências sendo elas: cálculo do comprimento de fita supercondutora para obter a indutância total necessária para se conseguir obter a energia armazenada e pretendida numa só bobina, cálculo da indutância total em mais do que uma bobina em função da energia que se pretende armazenar obtendo o comprimento de fita necessário e por último o cálculo da indutância das bobinas dado o comprimento de fita supercondutora que se quer utilizar por cada bobina.

Para todos os casos é necessário fornecer ao algoritmo especificações da fita supercondutora sendo elas a espessura da fita, largura da fita, raio mínimo de curvatura e corrente elétrica crítica.

4.2.1. Cálculo do comprimento de fita supercondutora para uma bobina

O algoritmo desenvolvido neste caso tem como objetivo calcular o comprimento de fita supercondutora necessário a utilizar para uma dada energia especificada pelo utilizador. Para tal é necessário fornecer as especificações da fita supercondutora e qual a energia que pretende armazenar, só depois de estes dados serem fornecidos pelo utilizador o algoritmo calcula o número de espiras, o valor da auto indutância da bobina para a energia armazenada pretendida e fornece o comprimento total de fita supercondutora que é necessário utilizar.

É possível também retirar valores de cálculos intermédios como o raio externo da bobina e o raio médio da bobina, que são obtidos através das expressões dadas em (4.9) e (4.10). Sendo que N é o número de espiras, o esp é a espessura da fita supercondutora, R_{ext} é o raio externo da bobina, R_{int} é o raio interno da bobina e R_{med} é o raio médio da bobina.

$$R_{ext} = R_{int} + N \times esp \quad (4.9)$$

$$R_{med} = R_{int} + \left(\frac{R_{ext} - R_{int}}{2} \right) \quad (4.10)$$

A Figura 4.3 representa em fluxograma o funcionamento do algoritmo desenvolvido em MATLAB relativo ao cálculo do comprimento da fita supercondutora para obter a indutância total necessária para se atingir a energia armazenada pretendida numa só bobina.

No fluxograma não está representado, mas é também possível obter o gráfico relativo à curva do comprimento da fita supercondutora em função da indutância, posteriormente será mostrado os resultados obtidos para um caso concreto.

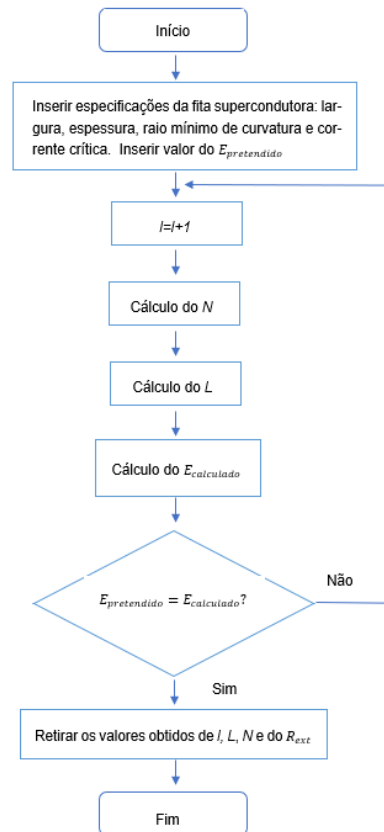


Figura 4.3 - Fluxograma relativo ao cálculo do comprimento de fita supercondutora para uma bobina desenvolvido em MATLAB.

4.2.2. Cálculo do comprimento de fita supercondutora necessária e da indutância total para várias bobinas em função da energia armazenada pretendida

Este caso do algoritmo foi desenvolvido para que através das especificações da fita supercondutora e das características que queremos para a construção do sistema SMES como o número de bobinas que pretendemos (sendo que o número máximo de bobinas é de cinco, pois a partir da sexta bobina o valor de indutância mútua torna-se desprezável) e a distância entre cada bobina, devendo esta distância ser sempre igual entre bobinas, por limitação do próprio algoritmo desenvolvido.

Depois dos dados de entrada do algoritmo serem fornecidos tal como no caso anterior, este inicia o processo de cálculo começando pelo número de espiras, em seguida realiza os cálculos de auto-indução e de indução mútua, obtendo-se a indução total através da expressão dada em (4.11). Posteriormente efetua-se o cálculo da energia total armazenada através do resultado obtido pela

indutância total, e por último, calcula-se o comprimento de fita supercondutora total dada pela expressão (4.12).

Na expressão (4.11) L é o valor de auto-indução e L_m é o valor de indução mútua, na expressão (4.12) l é o comprimento utilizado em cada bobina.

$$L_{total} = n^{\circ} \text{ de bobinas} \times L + L_m \quad (4.11)$$

$$l_{total} = l \times n^{\circ} \text{ de bobinas} \quad (4.12)$$

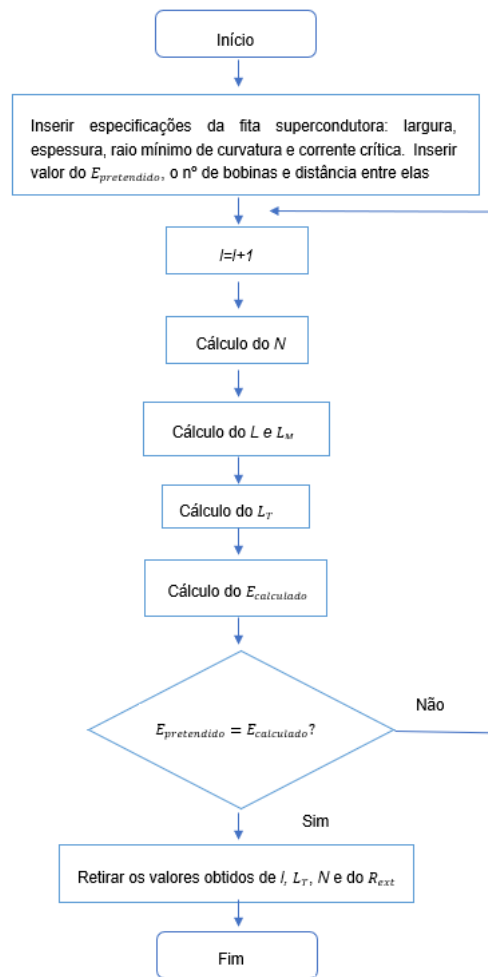


Figura 4.4 - Fluxograma relativo ao cálculo do comprimento de fita supercondutora necessária e da indutância total para várias bobinas em função da energia que se pretende armazenar.

A Figura 4.4 representa em fluxograma o funcionamento do algoritmo desenvolvido em MATLAB, relativo ao cálculo do comprimento de fita supercondutora necessária e da indutância total para várias bobinas em função da energia armazenada pretendida. Embora no fluxograma não esteja representado, através do algoritmo é possível obter o gráfico que demonstra a curva do comprimento da fita

supercondutora total em todas as bobinas em função da indutância total. Posteriormente serão mostrados os resultados obtidos para um caso concreto.

4.2.3. Cálculo da indutância total das bobinas dado o comprimento de fita supercondutora que se pretende utilizar por cada bobina

O que se pretende com este segmento do algoritmo é contrário aos anteriores, pois neste caso em vez de se procurar a quantidade de fita necessária para se obter uma determinada indutância pretende-se que o utilizador indique o comprimento de fita supercondutora que quer utilizar por cada bobina, sendo o mesmo valor de comprimento de fita supercondutora utilizada igual para todas as bobinas. Através do número de bobinas que se pretende, o algoritmo calcula a indutância total.

O processo de cálculo é semelhante aos referidos anteriormente, sendo a principal diferença a de o utilizador especificar a quantidade de fita supercondutora que quer utilizar ao invés de ser o algoritmo a calcular.

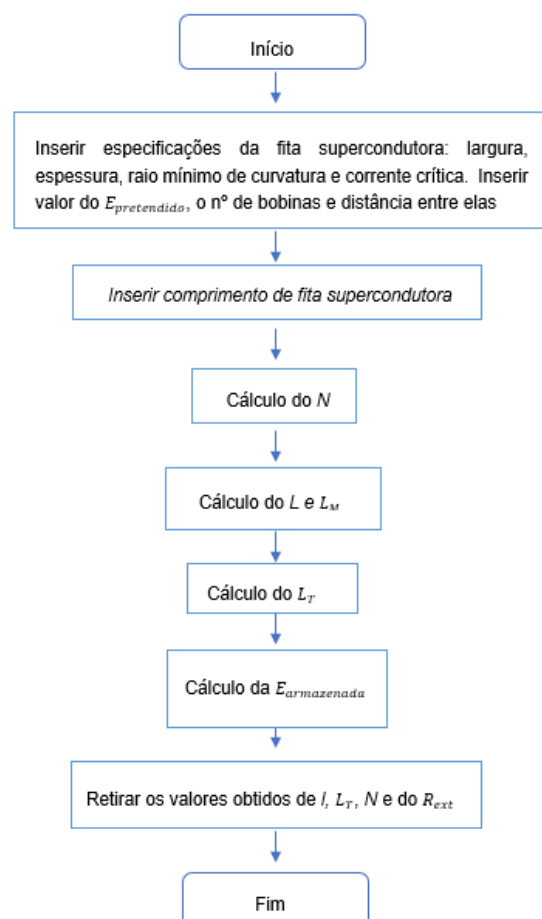


Figura 4.5 - Fluxograma relativo ao terceiro segmento do algoritmo desenvolvido, cálculo da indutância total dado um comprimento de fita supercondutora.

4.3. Dimensionamento em ambiente MATLAB

A peça-chave de um sistema SMES é a bobina supercondutora. Através do algoritmo desenvolvido procede-se ao dimensionamento da bobina supercondutora, e de acordo com o que se pretende, verifica-se qual a configuração que melhor corresponde ao desejado. Para tal é necessário em primeiro lugar proceder à escolha de uma fita supercondutora HTS e verificar as suas especificações.

Nesta dissertação a fita supercondutora escolhida é da produtora *American Superconductor Corp* type 8502-350.

Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 estão presentes as propriedades mecânicas e elétricas da fita supercondutora utilizadas para realizar o dimensionamento:

Propriedades Mecânicas	Unidade (mm)
Espessura média	0,18-0,22
Largura	12
Raio mínimo de curvatura	15

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas da fita supercondutora utilizadas para o dimensionamento, adaptado de [49].

Propriedades Elétricas	Unidade (A)
Corrente Crítica (I_c)	350

Tabela 4.2 - Propriedades elétricas da fita supercondutora a 77 K, em auto campo, 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$, por 1 m de resolução, adaptado de [49].

Para o dimensionamento e validação de resultados é necessário definir o valor de energia que se pretende armazenar e o valor da indutância total.

A Tabela 4.3 indica os valores que se irá procurar obter no dimensionamento da bobina supercondutora para o sistema SMES.

Energia Armazenada ($E_{armazenada}$)	3000 J
Indutância total (L_{total})	100 mH

Tabela 4.3 - Valores que se pretende obter para a bobina supercondutora do sistema SMES.

Foram analisadas várias configurações dependendo do número de bobinas que se pretende utilizar. Para o dimensionamento da bobina supercondutora do sistema SMES, vamos analisar qual a melhor solução para uma bobina supercondutora solenoidal em panqueca, desde uma até cinco bobinas.

É utilizado 70% da corrente crítica ($I_{70\%} = 245 \text{ A}$)¹, sendo este um valor comum utilizado em projeto, estabeleceu-se ainda para questões de simulação uma distância de 5 mm entre cada bobina.

Através do algoritmo MATLAB é realizado o dimensionamento para as características dadas pela Tabela 4.3 e pelas especificações da fita supercondutora. Na Tabela 4.4 estão presentes os resultados obtidos pelo algoritmo para as diferentes configurações, onde l_{total} é comprimento total de fita supercondutora HTS necessária para a construção da bobina, $N_{espiras}$ é o número de espiras, R_{ext} é o raio externo, R_{med} é o raio médio, R_{int} é o raio interno, L é o valor de auto indução por bobina e L_M é o valor de indução mútua.

	1 Bobina	2 Bobinas	3 Bobinas	4 Bobinas	5 Bobinas
l_{total} (m)	527	464	453	460	470
$N_{espiras}$	841	535	418	357	317
R_{ext} (mm)	183,2	122	98,6	86,4	78,4
R_{med} (mm)	99,1	68,5	56,8	50,7	46,7
R_{int} (mm)	15	15	15	15	15
L (mH)	99,9	28,5	14,7	9,7	7,1
L_M (mH)	-	43,5	56,1	62,31	64,4

Tabela 4.4 - Valores obtidos para as diferentes configurações testadas, com 5 mm de distância entre bobinas e com $I_c=245 \text{ A}$, para os valores pretendidos na Tabela 4.3.

¹Na realidade, este valor não é alcançável em muitas realizações práticas, nomeadamente com fita de primeira geração, em que a redução pode ser substancialmente superior [46], devido ao campo magnético próprio e das bobinas adjacentes.

É de notar que o valor total de indutância é calculado pela expressão (4.11), pelo que, só a configuração com uma bobina não tem necessidade de efetuar o respetivo cálculo, por esta não ter indutância mútua, sendo que a sua indutância total é o valor da auto indutância (99,9 mH).

Pelo que na Tabela 4.5 estão os valores calculados através da expressão dada em (4.11).

	2 Bobinas	3 Bobinas	4 Bobinas	5 Bobinas
$L_{total} (mH)$	100,5	100,2	100,9	100,1

Tabela 4.5 - Valores da indutância total para as diferentes configurações analisadas.

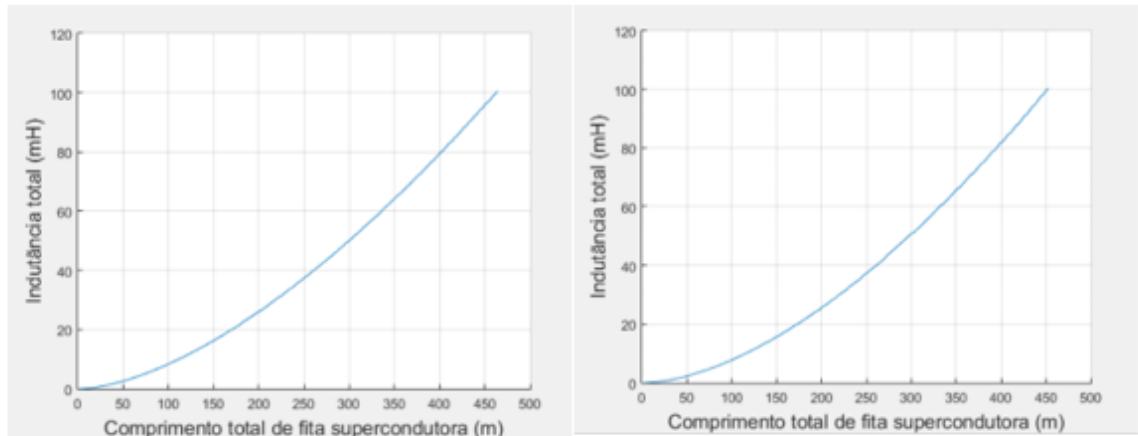
Como se pode verificar os valores obtidos andam muito próximos do valor desejado ($L_{total}=100$ mH), existindo pequenas variações.

A Figura 4.6 representa para a configuração com uma bobina a curva da indutância total em função do aumento do comprimento da fita supercondutora até à energia armazenada de 3000 J.



Figura 4.6 - Gráfico relativo a indutância em função do comprimento total de fita supercondutora para a configuração para uma bobina.

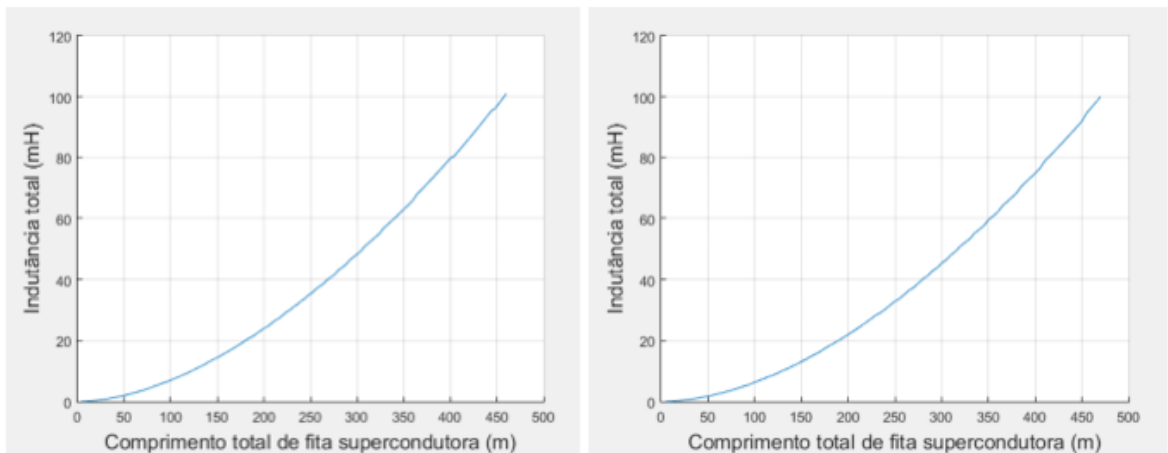
A Figura 4.7 e Figura 4.8 representam para diferentes configurações a curva da indutância total em função do aumento do comprimento da fita supercondutora até uma energia armazenada de 3000 J, sendo perceptíveis as diferenças de comprimento de fita supercondutora necessária para cada configuração em análise.



a) Configuração com duas bobinas

b) Configuração com três bobinas

Figura 4.7 - Gráficos relativos à indutância em função do comprimento total de fita supercondutora para a configuração com duas bobinas em a) e com três bobinas em b).



a) Configuração com quatro bobinas

b) Configuração com cinco bobinas

Figura 4.8 - Gráficos relativos à indutância em função do comprimento total de fita supercondutora para a configuração com quatro bobinas em a) e com cinco bobinas em b).

Um fator bastante relevante na construção de um sistema SMES é o fator económico, pelo que quanto menor quantidade de fita supercondutora HTS seja necessária para a construção da bobina supercondutora, mais barato fica o sistema SMES, pois a fita supercondutora ainda é um material bastante dispendioso. Esse fator leva com que a configuração com três bobinas seja a mais indicada para este caso particular, devido ao fato de ser a que menos fita supercondutora HTS necessita para atingir os valores pretendidos de energia armazenada de 3000 J, sendo que o valor de fita supercondutora necessária para cumprir com os objetivos enunciados é de 453 m.

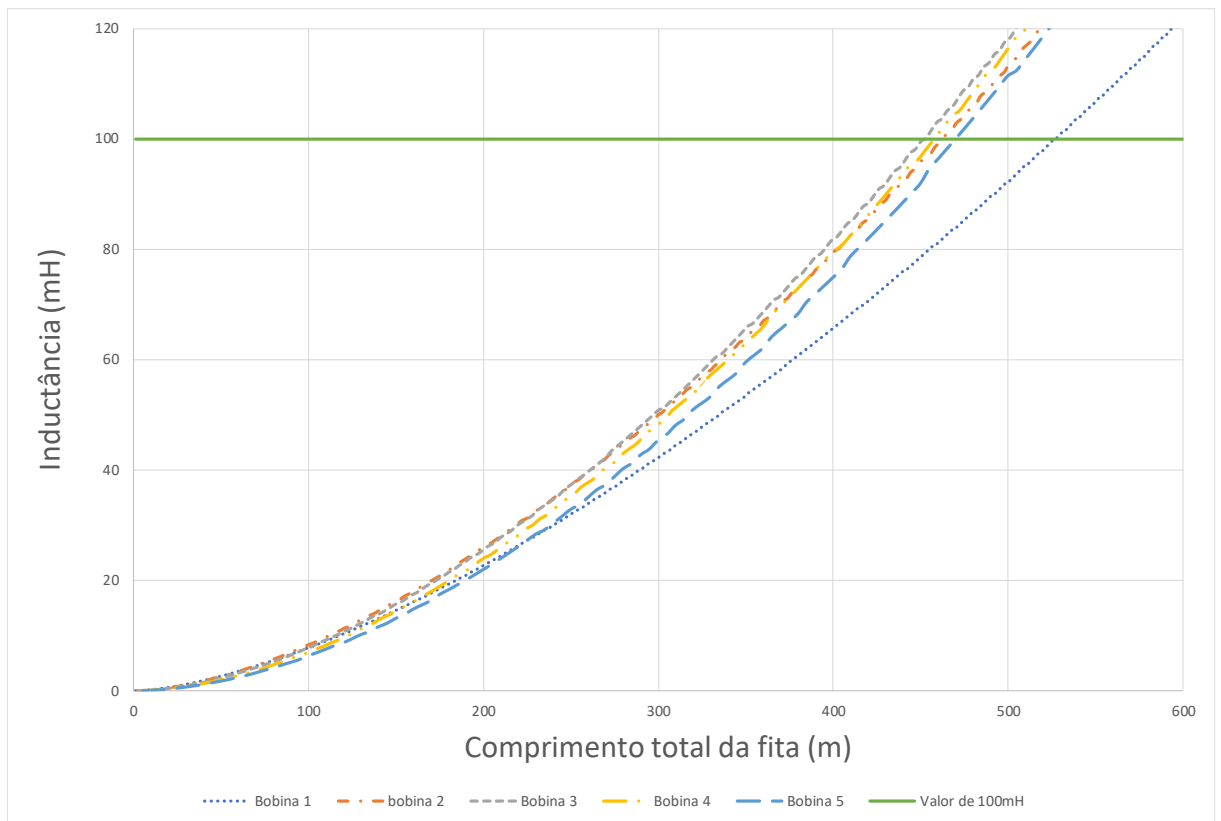


Figura 4.9 - Gráfico com as diferentes curvas referentes às diferentes configurações dimensionais para um valor de 100 mH de indutância total.

É possível verificar através da Figura 4.9 que, da configuração de duas bobinas até à de cinco bobinas, existem pequenas diferenças nas quantidades de fita necessária para uma indutância com 100 mH, sendo a configuração com três bobinas a que menos fita requer.

A configuração de uma bobina é a que mais fita supercondutora necessita, pois como seria expectável a configuração que não tem indução mútua é a que requer uma maior quantidade de fita supercondutora para atingir as especificações pretendidas.

A Figura 4.10 representa as diferentes curvas para um comprimento total de fita supercondutora de 1000 m, ou seja, só é utilizado um total de 1000 m para cada uma das configurações testadas, e mostra o valor de indutância total obtido para cada uma em análise, ficando demonstrado que para esta situação a configuração que obtém uma indutância total mais elevada é com quatro bobinas.

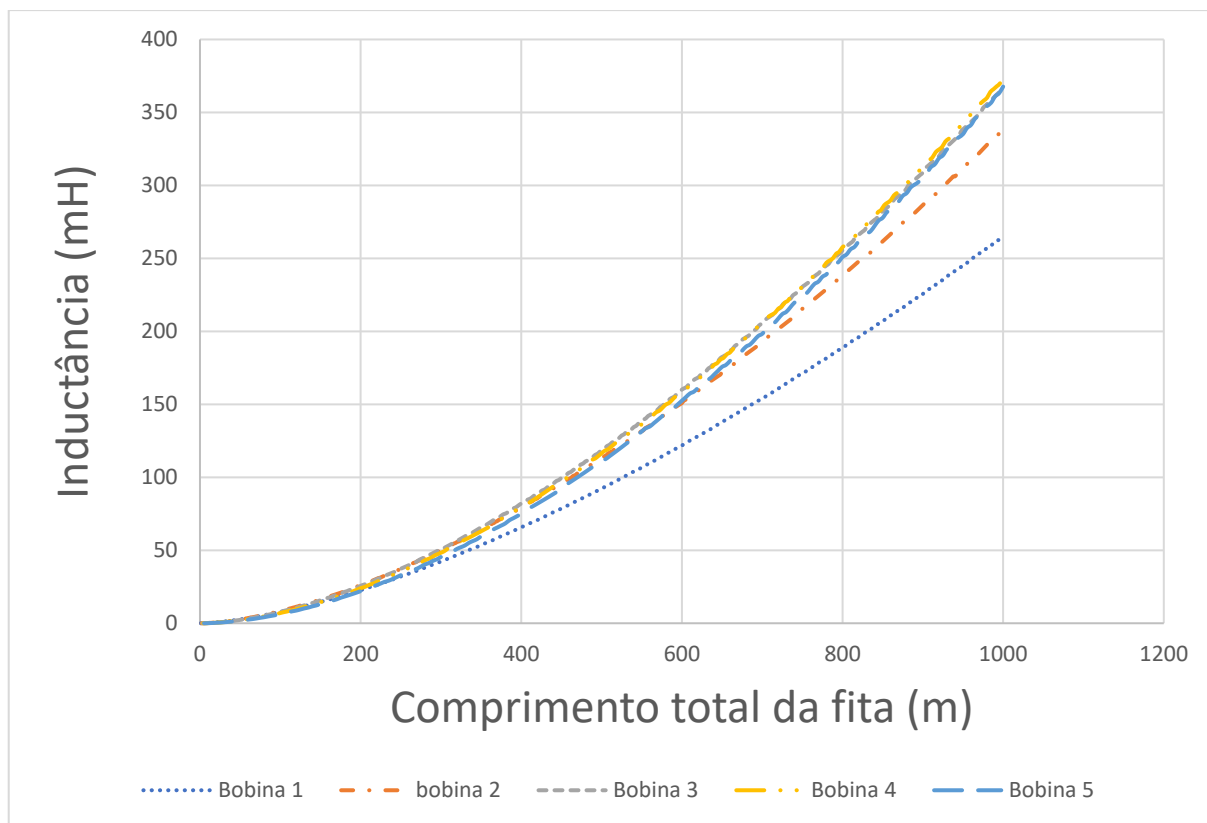


Figura 4.10 - Gráfico com as diferentes curvas referentes às diferentes configurações para um valor máximo de 1000 m de fita supercondutora para as diferentes configurações dimensionadas.

É de notar que a configuração que obtém a indutância total mais elevada é a de quatro bobinas. O gráfico de barras presente na Figura 4.11 mostra os valores máximos obtidos por cada configuração com 1000 m de fita supercondutora total para cada.

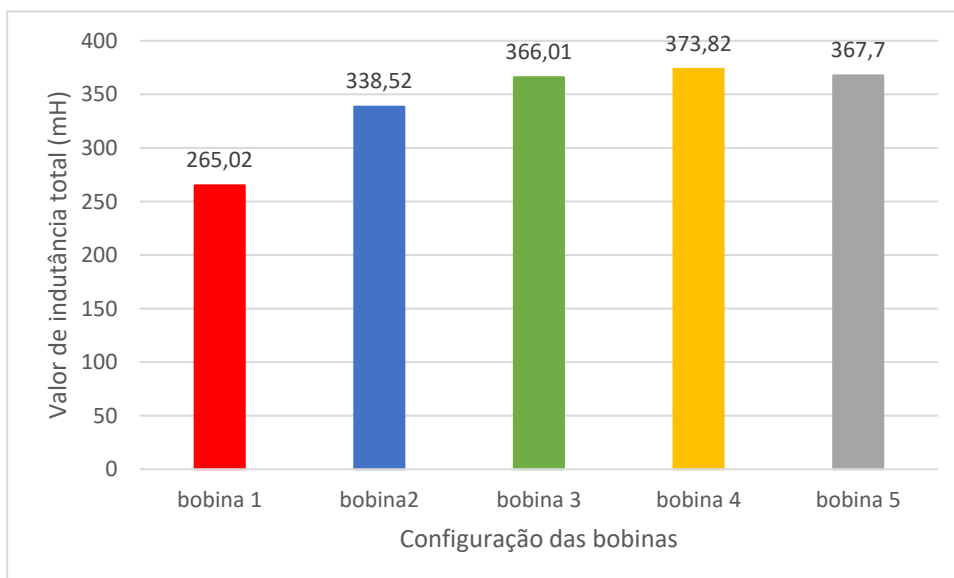


Figura 4.11 - Valor de indutância total para 1000 m de fita supercondutora para cada configuração.

4.4. Simulação em ambiente COMSOL Multiphysics

Através do dimensionamento realizado em ambiente MATLAB, procurou-se validar os resultados num software de elementos finitos como é o COMSOL Multiphysics.

A partir dos valores obtidos em ambiente MATLAB, resultados que estão na Tabela 4.4, realizaram-se as simulações para cada configuração, de modo a confirmar-se os resultados obtidos na Tabela 4.5, coincidem com os resultados simulados pelo software de elementos finitos. De igual modo se procedeu para a configuração com uma bobina. Tendo em consideração que trabalhos anteriores [50] demonstraram não existir dependência do coeficiente de indução no material considerado, foi utilizado o cobre para a realização da simulação da bobina em COMSOL Multiphysics, esta é analisada como um bloco, então a utilização de cobre ao invés da fita supercondutora permite obter resultados similares.

As simulações realizadas no ambiente COMSOL Multiphysics são realizadas através do método dos elementos finitos, sendo criada uma malha em que o software permite escolher a resolução mais apropriada ao estudo, consoante a solução que se pretende. Esta divide uma região em elementos mais pequenos, e os elementos da malha são triângulos que subdividem as regiões a serem simuladas.

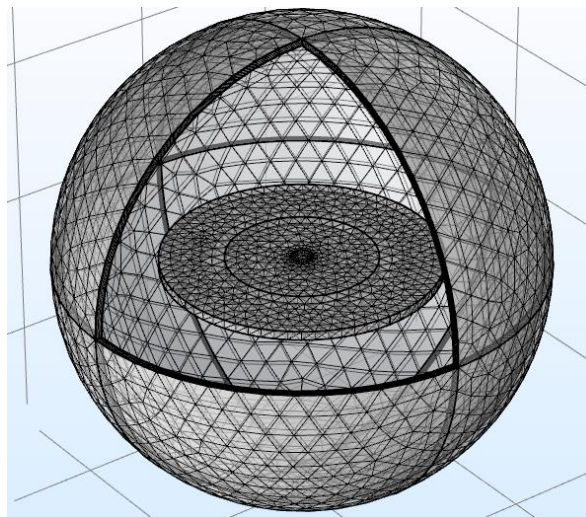


Figura 4.12 - Exemplo da malha criada para a simulação para a configuração com uma bobina.

Através das simulações efetuadas em 3D, é possível obter gráficos que nos indicam o valor da densidade de fluxo magnético (B) ao longo da bobina e, conseqüentemente, obtém-se o valor da indução total da bobina e o valor da energia magnética total.

Nas simulações efetuadas consideram-se condições de fronteira do tipo *Dirichlet* (fluxo magnético nulo na fronteira do domínio).

- **Configuração com uma bobina**

Através da simulação efetuada é perceptível que a maior concentração de densidade de fluxo magnético é no núcleo de ar da bobina. Os resultados obtidos relativos a esta simulação estão presentes Figura 4.13, onde é visível valores máximos de $B \approx 2,5 \text{ T}$

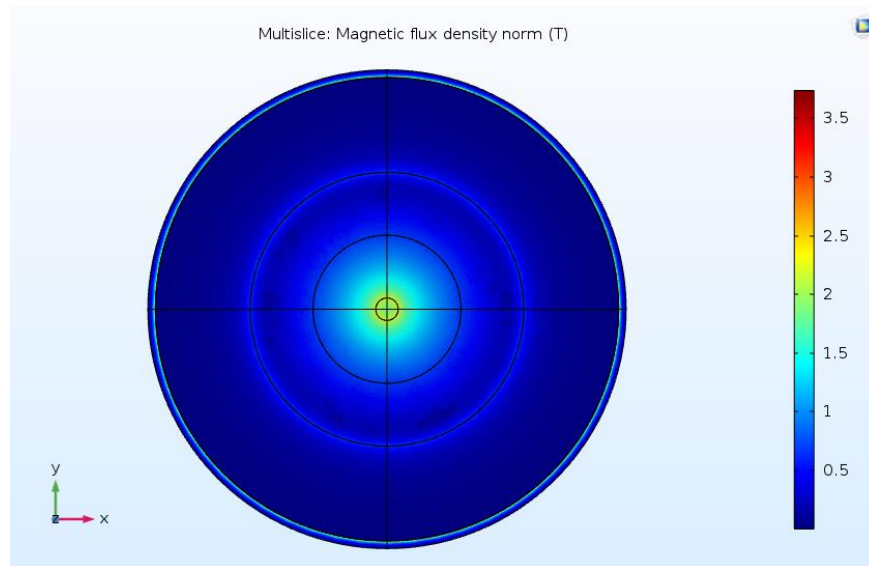


Figura 4.13 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos para a configuração de uma bobina na simulação em COMSOL através da vista em planta.

- **Configuração com duas bobinas**

Através da comparação entre a Figura 4.13 e a Figura 4.14, verifica-se que o valor de densidade de fluxo magnético aumenta em relação à configuração com uma bobina, mas é igualmente verificado que a maior concentração se encontra no núcleo de ar das bobinas, com valores máximos de $B \approx 3 \text{ T}$.

Tanto na vista em alçado como vista em planta, é perceptível como a densidade de fluxo magnético tem uma maior concentração no núcleo de ar das duas bobinas.

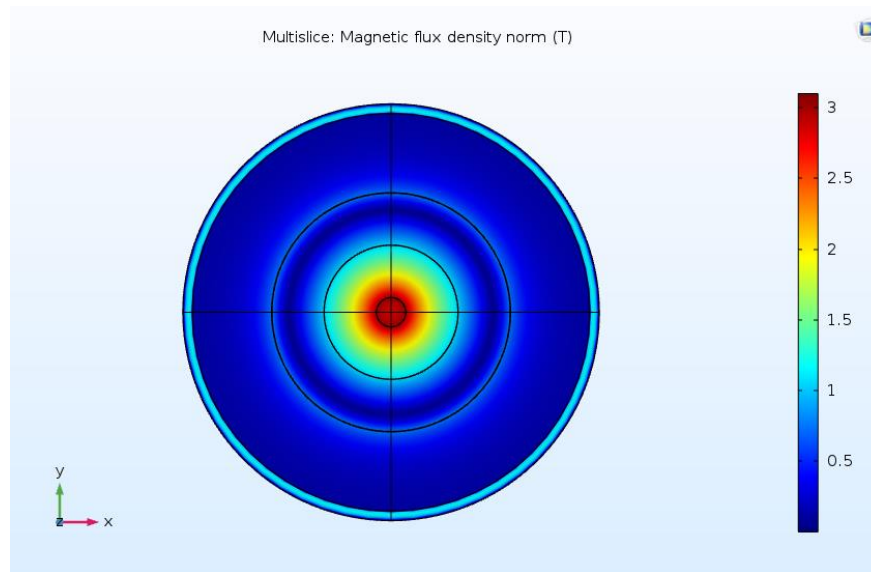


Figura 4.14 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em planta para a configuração com duas bobinas.

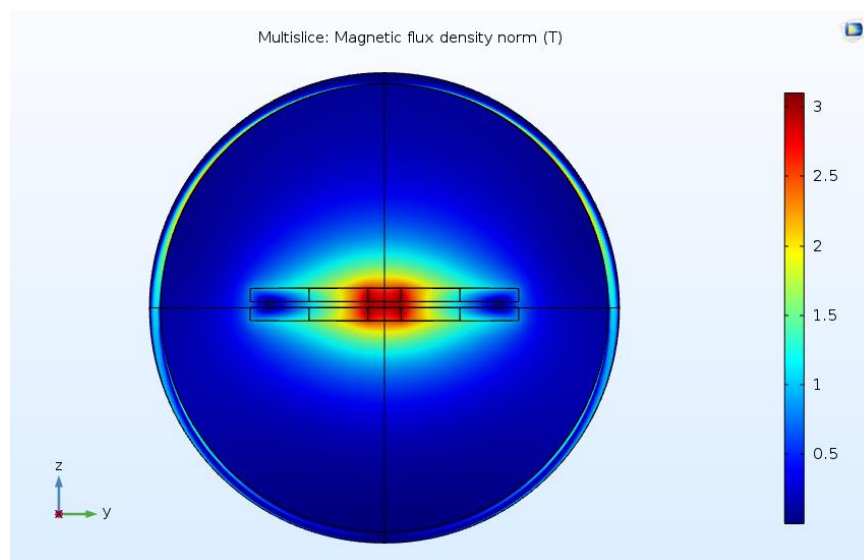


Figura 4.15 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em alçado para a configuração com duas bobinas.

- **Configuração com três bobinas**

A Figura 4.16 e Figura 4.17 apresentam os resultados obtidos para a configuração com três bobinas que, em dimensionamento MATLAB, se apresentou como a melhor solução encontrada para os objetivos propostos. Como nas anteriores simulações verifica-se que a maior concentração de densidade de fluxo magnético se encontra no núcleo de ar das bobinas, chegando a atingir valores máximos de $B \approx 4 \text{ T}$.

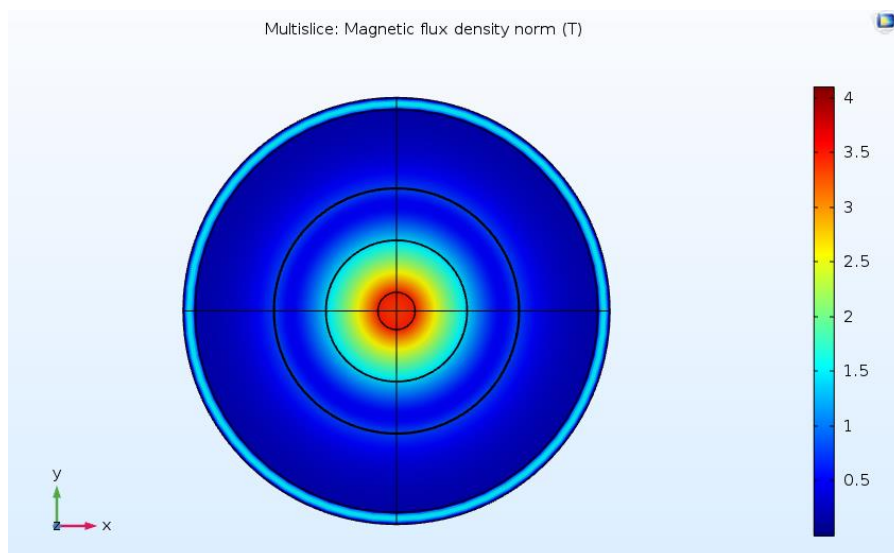


Figura 4.16 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em planta para a configuração com três bobinas.

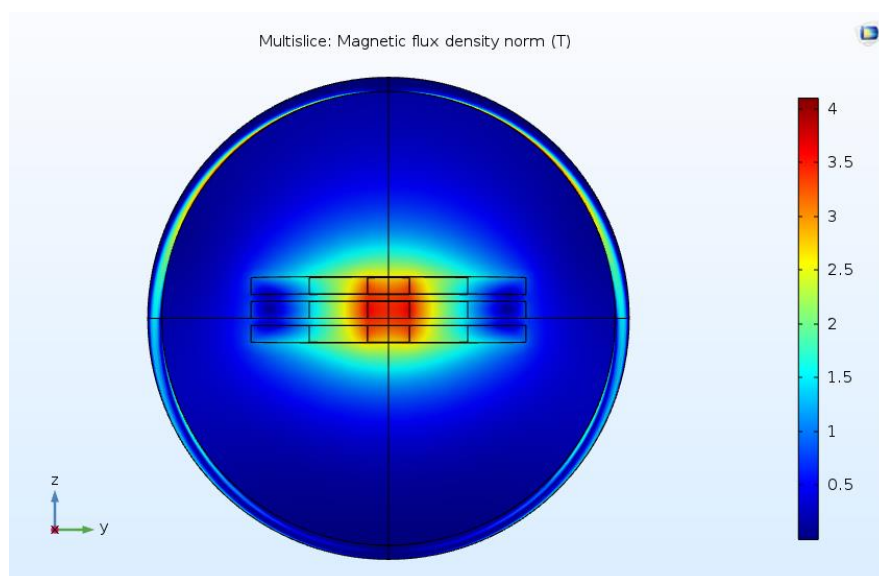


Figura 4.17 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em alçado para a configuração com três bobinas.

- **Configuração com quatro bobinas**

Na Figura 4.18 e Figura 4.19, apresentam diferentes vistas da simulação em COMSOL relativas à configuração com quatro bobinas. Como nos anteriores casos, também aqui a densidade de fluxo magnético está mais concentrada nos núcleos de ar das bobinas, sendo que esta vai diminuindo à medida que se está mais distante do núcleo de ar das bobinas.

Neste caso o valor máximo de $B \approx 4,4 \text{ T}$. É de notar que as bobinas que se encontram nas extremidades possuem um valor de densidade de fluxo magnético ligeiramente mais baixo do que as situadas a meio.

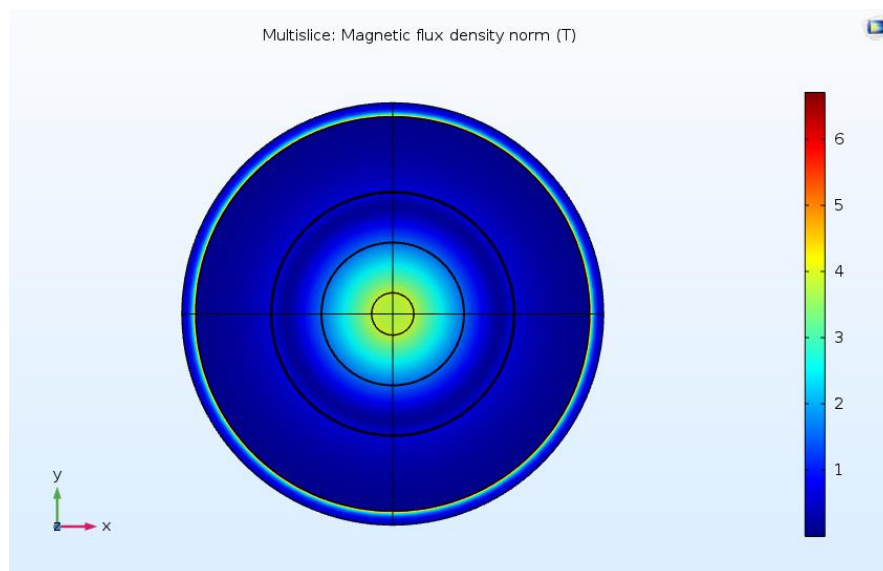


Figura 4.18 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em planta para a configuração com quatro bobinas.

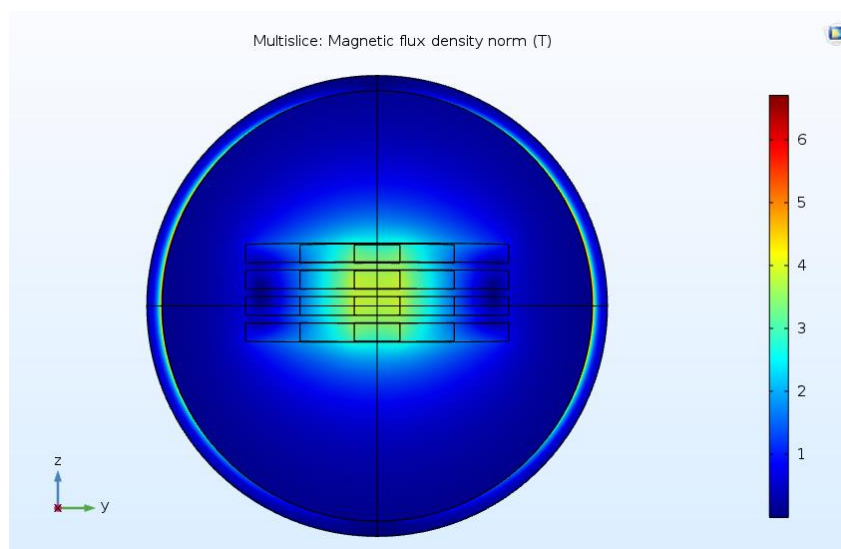


Figura 4.19 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em alçado para a configuração com quatro bobinas.

- **Configuração com cinco bobinas**

Na Figura 4.20 e Figura 4.21 são apresentadas a vista em planta e a vista em alçado respectivamente, realizadas em simulação COMSOL para a configuração com cinco bobinas. Como em todos os casos anteriores verificam-se condições semelhantes para a densidade de fluxo magnético como seria expectável. Neste caso tal como no anterior, verifica-se que as bobinas que se encontram nas extremidades possuem um valor de densidade de fluxo ligeiramente mais baixo do que as que se encontram no meio. Neste caso o valor máximo de $B \approx 4,7 \text{ T}$.

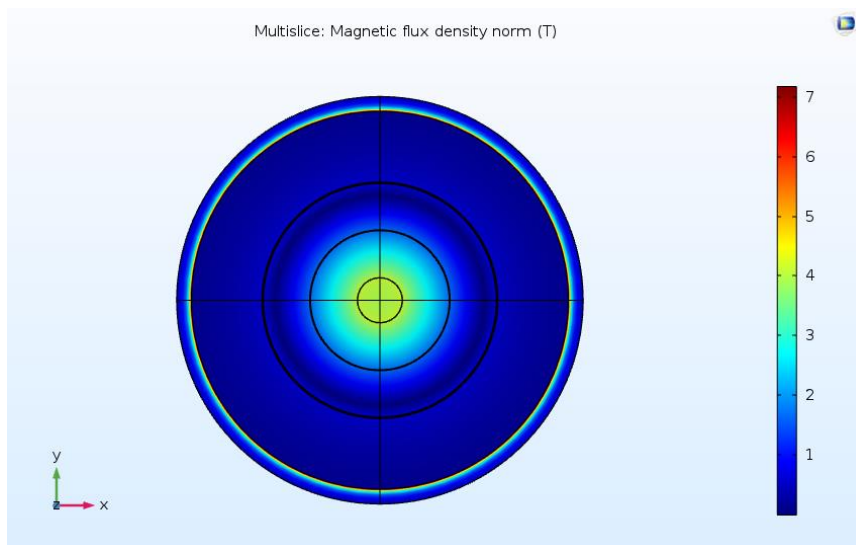


Figura 4.20 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em planta para a configuração com cinco bobinas.

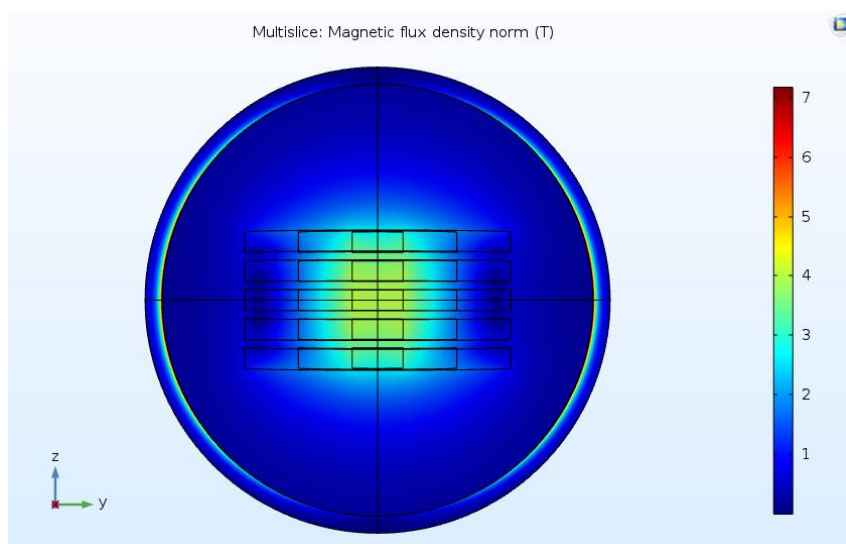


Figura 4.21 - Resultados da densidade de fluxo magnético obtidos na simulação em COMSOL através da vista em alçado para a configuração com cinco bobinas.

Os resultados de L_{total} e $E_{armazenada}$ obtidos para cada configuração estão presentes na Tabela 4.6, é de notar que todas foram simuladas na topologia solenoidal em panqueca, com as especificações obtidas na Tabela 4.4, com a distância de 5 mm entre cada bobina e com 70% da corrente crítica ($I_c(70\%) = 245\text{ A}$).

	1 Bobina	2 Bobinas	3 Bobinas	4 Bobinas	5 Bobinas
$L_{total}\text{ (mH)}$	100,62	98,1	97,2	101,7	100,9
$E_{armazenada}\text{ (J)}$	3000,2	2944,2	2916,7	3053,3	3027,9

Tabela 4.6 - Resultados obtidos em simulação no software COMSOL.

Na Figura 4.22 é apresentado um gráfico de barras que ilustra os valores da variação entre o valor de indutância total dimensionado em software MATLAB e o valor simulado no ambiente COMSOL.

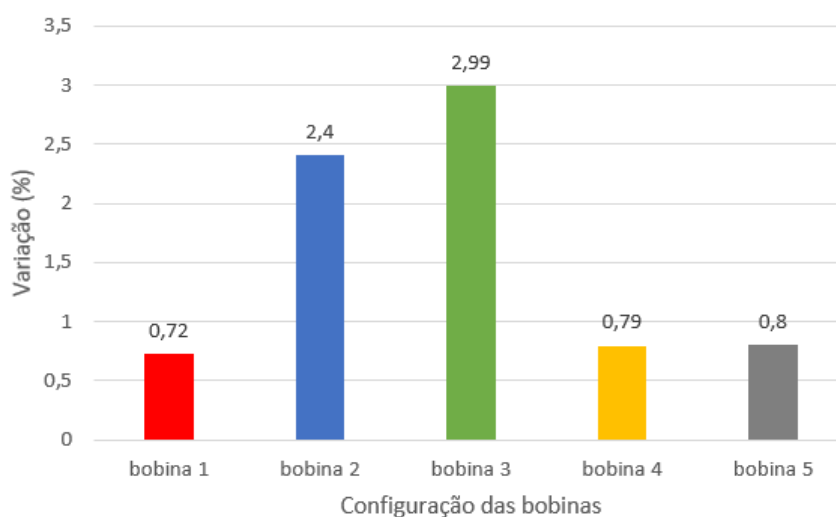


Figura 4.22 - Variação do valor de indutância total entre o dimensionado em MATLAB em função dos valores obtidos na simulação no software COMSOL.

Verificou-se que a variação entre o dimensionado em MATLAB e o simulado em COMSOL é reduzido, atingindo um valor máximo de variação de 2,99% na configuração de três bobinas, e um valor mínimo de 0,72% de variação para a configuração com uma bobina.

4.4.1. Simulação da topologia toroidal

No ambiente COMSOL foi testada a topologia toroidal de forma a verificar se esta poderia revelar-se mais benéfica para o sistema analisado anteriormente. Para a simulação deste caso, foram utilizados os resultados obtidos no dimensionamento da configuração com cinco bobinas, presente na Tabela 4.4, de modo a que se pudesse exercer uma comparação com a topologia solenoidal.

Inicialmente foi necessário proceder aos cálculos da posição das bobinas, considerando que em 360° estão presentes cinco bobinas, então para estas estarem à mesma distância entre elas, devem estar separadas por 72° .

É necessário analisar o raio do centro das bobinas até ao centro do núcleo de ar das bobinas, de modo a que estas não se sobreponham ou toquem. Para efetuar o cálculo das posições de cada bobina no eixo x é dada por (4.13) e no eixo y é dada por (4.14), enquanto que no eixo z todas se encontram na mesma posição. Nas expressões seguintes r é o raio do centro das bobinas até ao centro do núcleo de ar da bobina e θ representa do ângulo em graus.

$$\text{Posição no eixo x} = r \times \cos \theta \quad (4.13)$$

$$\text{Posição no eixo y} = r \times \sin \theta \quad (4.14)$$

Na Figura 4.23 é possível analisar como a densidade de fluxo magnético se dispersa na topologia toroidal. São perceptíveis as diferenças de como a densidade de fluxo magnético se dispersa em comparação com a topologia solenoidal presente na Figura 4.21.

É de notar que o valor da densidade de fluxo é mais baixo na topologia toroidal com um valor máximo de $B \approx 1,6 \text{ T}$ devido ao facto de as bobinas se encontrarem a uma distância maior entre si, originando que o valor da indutância mútua seja menor.

Nesta situação é bastante claro que a topologia solenoidal em panela é melhor solução que a toroidal.

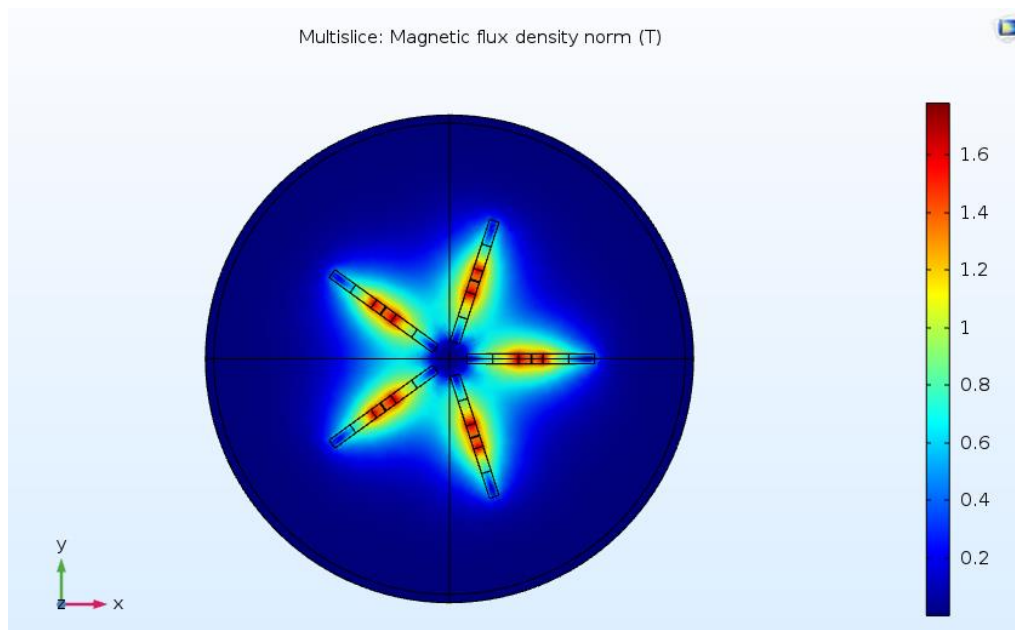


Figura 4.23 - Vista em planta da simulação em software COMSOL da configuração com cinco bobinas da topologia toroidal, com um raio de 100 mm.

Foram simulados vários valores de raio, de modo a chegar-se ao valor em que o L_{total} era máximo, os resultados obtidos consoante as variações do raio estão presentes na Tabela 4.7.

Raio (mm)	90	95	100	105	110	115
L_{total} (mH)	41,9	41,8	41,7	40,9	40,2	39,7

Tabela 4.7 - Valores da indução total obtidos para topologia toroidal com 5 bobinas consoante a variação do valor do raio.

Sabendo que o valor de auto indutância é de 7,1 mH para cada bobina no dimensionado para a configuração com cinco bobinas, valor este obtido em MATLAB, mostrado na Tabela 4.4 e posteriormente confirmado no ambiente COMSOL. Obtém-se então que o valor mínimo de indutância total vai ser igual ao valor de auto indutância de cada bobina multiplicado pelo número de bobinas, as quais neste caso são cinco, obtendo-se então um valor mínimo de 35,5 mH, considerando que o valor da indutância mútua é nulo.

De modo a perceber-se como seria o aumento do valor da indutância, simulou-se em ambiente COMSOL a topologia toroidal com dez bobinas, tendo estas as mesmas especificações do que as bobinas obtidas na configuração com cinco bobinas presente na Tabela 4.4.

Tal como na simulação toroidal para cinco bobinas também aqui é necessário efetuar os cálculos das posições das bobinas, de modo a que estas se encontrem à mesma distância.

Considerando que em 360° estão presentes dez bobinas, conclui-se que para estas estarem à mesma distância entre elas, devem estar separadas por 36° . Tal como anteriormente se verificou, para efetuar o cálculo das posições de cada bobina no eixo x é dada pela expressão em (4.13) e no eixo y é dada por (4.14) enquanto que no eixo z todas se encontram na mesma posição.

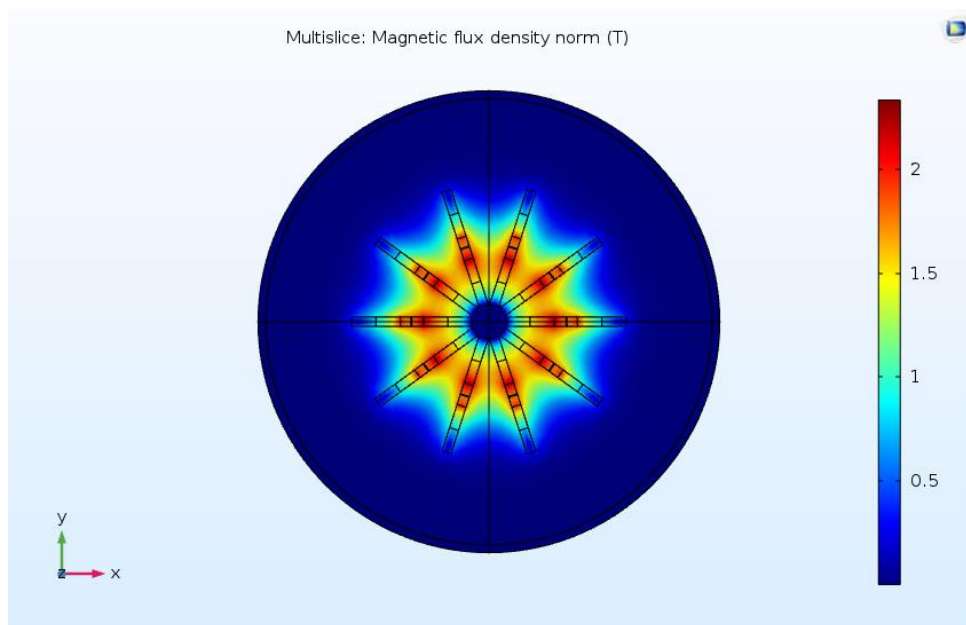


Figura 4.24 - Vista em planta da simulação em software COMSOL da configuração com dez bobinas da topologia toroidal, com um raio de 100 mm.

Dado que o valor de auto indutância é de 7,1 mH para cada bobina, obtém-se então que o valor mínimo de indutância total vai ser igual ao valor de auto indutância de cada bobina multiplicado pelo número de bobinas que neste caso são dez. Obtendo-se então um valor mínimo de 71 mH, considerando-se que o valor da indutância mútua é nulo.

	5 bobinas (raio 100 mm)	10 bobinas (raio 100 mm)
L (mH)	35,5	71
L_M (mH)	6,2	48,68
L_{total} (mH)	41,7	119,68

Tabela 4.8-Comparação de resultados entre a topologia toroidal com 5 bobinas e 10 bobinas ambas com um raio de 100 mm até ao centro do núcleo de ar da bobina.

Ao aumentarmos para o dobro o número de bobinas mantendo o raio a 100 mm, a distância entre bobinas passa para metade, fazendo com que a indutância mútua aumente.

Pelos resultados obtidos é bastante perceptível a grande diferença de valores, com um aumento da indutância mútua de 7,85 vezes superior com dez bobinas do que com cinco bobinas. Enquanto que o valor da auto indutância é de 71 mH, sendo este valor o dobro do obtido com apenas cinco bobinas, devido ao facto de o número de bobinas ter igualmente passado para o dobro. O aumento da indutância total também é significativo, pois passa para 119,68 mH um valor 2,87 vezes superior que o valor obtido para a configuração toroidal com 5 bobinas.

A Tabela 4.9 representa os resultados obtidos para quatro valores diferentes do raio, calculando o valor de indutância total para cada situação.

<i>Raio (mm)</i>	100	110	120	150
<i>L_{total} (mH)</i>	119,68	110,87	104,17	91,40

Tabela 4.9 - Valores da indução total obtidos para topologia toroidal com 10 bobinas consoante a variação do valor do raio.

Como seria expectável o valor da indutância total vai diminuindo, pois quando se aumenta o raio as bobinas ficam mais distantes, umas das outras, dando origem a que a indução mútua diminua. Consequentemente a indução total sofre com essa diminuição.

4.5. Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi desenvolvido o contributo que esta dissertação pretende dar para a construção de um sistema SMES.

Numa primeira fase deste capítulo passou-se por desenvolver um algoritmo em MATLAB, capaz de obter as especificações necessárias para a construção de uma bobina supercondutora para um sistema SMES, através de simplesmente ter como dados de entrada as características da fita supercondutora e a energia que se pretende armazenar.

Para se conseguir efetuar um estudo mais pormenorizado definiu-se a construção de um caso concreto, através da escolha de uma fita supercondutora e da energia que se pretendia armazenar na bobina supercondutora ($E_{armazenada} = 3000 J$), para diferentes configurações da bobina em topologia solenoidal em panqueca.

A segunda fase deste capítulo passou por confirmar os resultados obtidos no algoritmo através de simulações num software de elementos finitos, neste caso o COMSOL Multiphysics. Foram também realizadas simulações de duas diferentes topologias (solenoidal e toroidal), de modo a conseguir-se efetuar uma comparação para situações semelhantes e perceber qual a topologia mais benéfica para a situação em estudo, acabando por se revelar a topologia solenoidal a mais indicada do que a toroidal.

Através deste capítulo ficou demonstrado o papel que esta dissertação pode ter no dimensionamento de uma bobina supercondutora, e consequentemente a contribuição para a construção de um sistema SMES.

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1. Conclusões

Ao longo desta dissertação foi abordado o tema da supercondutividade, estudada a constituição de um sistema SMES, em especial a bobina supercondutora, e de como estes sistemas poderiam ser integrados de modo a melhorarem a qualidade da energia elétrica (QEE).

Através do desenvolvimento do algoritmo em MATLAB e das simulações efetuadas no software de elementos finitos COMSOL Multiphysics, conclui-se que os valores obtidos pelo algoritmo são válidos, existindo uma conformidade entre os resultados alcançados pelo algoritmo e pelos resultados obtidos nas simulações, demonstrando assim que este pode ser considerado uma ferramenta bastante útil no dimensionamento de uma bobina supercondutora e, conseqüentemente, ser um contributo relevante para o desenvolvimento de um sistema SMES.

No dimensionamento e simulações de uma bobina supercondutora para um caso concreto, em que foram estipuladas as condições para a sua construção, obteve-se que a configuração mais adequada seria com três bobinas, pois conseguia obter as especificações pretendidas a um menor custo, ou seja, utilizando a menor quantidade de fita supercondutora em relação às outras configurações analisadas.

Efetuaram-se também comparações entre a topologia solenoidal e toroidal para a configuração com cinco bobinas, de forma a verificar qual o valor de indutância total para ambas as topologias. Usando as mesmas especificações chegou-se à conclusão que a topologia solenoidal seria a mais indicada.

5.2. Trabalho Futuro

Como o trabalho desenvolvido nesta dissertação teve uma componente mais teórica, com o desenvolvimento do algoritmo MATLAB e as simulações num software de elementos finitos no COMSOL Multiphysics, seria importante construir as diferentes configurações analisadas, de forma a perceber se

os resultados obtidos, tanto no algoritmo como nas simulações, se transportariam verdadeiramente para um ambiente real.

Seria também interessante dimensionar e simular um sistema SMES integrado num gerador eólico em ambiente MATLAB SIMULINK, de modo a estudar-se as potenciais melhorias que estes sistemas podem trazer à QEE de um gerador eólico.

Por último, construir um sistema SMES em ambiente real através do que foi desenvolvido nesta dissertação e obtido em simulação, de forma a que se conseguisse melhorar a QEE vinda do gerador eólico presente no departamento de engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Bibliografia

- [1] ISR - Departamento de Engenharia Electrotécnica Universidade de Coimbra and E. de P. EDP, "Manual da qualidade da energia eléctrica," p. 112, 2005.
- [2] M. H. Ali, Bin Wu, and R. A. Dougal, "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, Apr. 2010.
- [3] D. van Delft and P. Kes, "The discovery of superconductivity," *Phys. Today*, vol. 63, no. 9, pp. 38–43, Sep. 2010.
- [4] R. J. P. Aguadeiro, "Desenvolvimento de um controlador para um sistema de armazenamento de energia em bobinas supercondutoras (SMES) (Dissertação em Mestrado)," Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2016.
- [5] J. Pina, "Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura (Dissertação de Doutoramento)," Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [6] "Heike Kamerlingh Onnes - Biographical." [Online]. Available: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html. [Accessed: 23-Jan-2018].
- [7] J.Oliveira, "Armazenamento de Energia em Bobinas Supercondutoras (Dissertação de Mestrado)," Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [8] A. Pronto, "Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura (Dissertação de Doutoramento)," Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [9] T. P. Sheahen, *Introduction to High-Temperature Superconductivity*. 1994.
- [10] J. Pina, "Tecnologia dos materiais supercondutores." p. 298, 2017.
- [11] J. K. S. Is, C. Beduz, R. L. Stoll, M. R. Harris, K. F. Goddard, and Y. Yang, "Prospects for large high-temperature superconducting power transformers : conclusions from a design study," vol. 41.
- [12] J. Ceballos, "Analysis of AC Losses In Superconducting Electrical Components For Application In The Design Of Electrical Systems (Dissertação de Doutoramento)," Universidad de Extremadura, 2010.
- [13] W. Buckles and W. V. Hassenzahl, "Superconducting magnetic energy storage," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 20, no. 5, pp. 16–20, May 2000.
- [14] H. J. Boenig, J. C. Bronson, D. Colyer, W. V Hassenzahl, R. D. Turner, and I. Schermer, "Ieee transactions," vol. M, no. 1, pp. 820–823, 1979.

- [15] EASE and EERA, "European energy Storage Technology Development Roadmap - 2017 Update," 2017.
- [16] S. Nagaya *et al.*, "The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan," *Cryogenics (Guildf)*., vol. 52, no. 12, pp. 708–712, Dec. 2012.
- [17] J. A. Leuer and R. A. Guman, "IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, March 1993 DESIGN, PERFORMANCE, AND COST CHARACTERISTICS OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE 33," vol. 8, no. 1, 1993.
- [18] N. Amaro, J. Murta Pina, J. Martins, and J. M. Ceballos, "SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE - A Technological Contribute to Smart Grid Concept Implementation," in *Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, 2012, no. July 2015, pp. 113–120.
- [19] P. Tixador, "Superconducting Magnetic Energy Storage : Status and Perspective," *IEEE/CSC ESAS Eur. Supercond. News Forum*, no. 3, pp. 1–14, 2008.
- [20] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, and D. Sutanto, "A study of the status and future of superconducting magnetic energy storage in power systems," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. R31–R39, Jun. 2006.
- [21] A. Arsoy, Y. Liu, P. F. Ribeiro, and F. Wang, "Power converter and SMES in controlling power system dynamics," *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol. 4, pp. 2051–2057, 2000.
- [22] Y. Du, E. Aeloiza, and V. R. V. Ramanan, "A high current bidirectional DC-DC converter for concept demonstration of grid-scale SMES systems," *ECCE 2016 - IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Proc.*, 2016.
- [23] I. J. Iglesias, J. Acero, and A. Bautista, "Comparative study and simulation of optimal converter topologies for SMES systems," *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 5, no. 2, pp. 254–257, Jun. 1995.
- [24] J. M. Goodkind, "Applications of Superconductivity," *Am. J. Phys.*, vol. 39, no. 1, pp. 9–23, Jan. 1971.
- [25] P. D. Baumann, "Energy conservation and environmental benefits that may be realized from superconducting magnetic energy storage," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 2, pp. 253–259, Jun. 1992.
- [26] R. M. da F. M. Pereira, "Estudo da Estabilidade Dinâmica de Tensão em Redes com Elevada Penetração de Energia Eólica (Dissertação de Douturamento)," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [27] M. V. Aware and D. Sutanto, "Improved controller for power conditioner using high-temperature superconducting magnetic energy storage (HTS-SMES)," *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol.

- 13, no. 1, pp. 38–47, Mar. 2003.
- [28] W. V. Torre and S. Eckroad, “Improving power delivery through the application of superconducting magnetic energy storage (SMES),” *IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc.*, vol. 00, no. C, pp. 81–87, 2001.
 - [29] X. Xue, K. Cheng, and D. Sutanto, “Power system applications of superconducting magnetic energy storage systems,” in *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, 2005, vol. 2, pp. 1524–1529.
 - [30] a. K. and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*. 2007.
 - [31] A. António and M. Nuno, “QEE_experiencia__edp_como_operador_rede.” EDP, 2007.
 - [32] S. Nagaya *et al.*, “Development of MJ-Class HTS SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips,” *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 770–773, Jun. 2004.
 - [33] K. Shikimachi *et al.*, “Development of MVA Class HTS SMES System for Bridging Instantaneous Voltage Dips,” *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 1931–1934, Jun. 2005.
 - [34] P. Tixador *et al.*, “First Tests of a 800 kJ HTS SMES,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, pp. 774–778, Jun. 2008.
 - [35] L. Xiao *et al.*, “Fabrication and Tests of a 1 MJ HTS Magnet for SMES,” vol. 18, no. 2, pp. 770–773, 2008.
 - [36] J. Zhang *et al.*, “Construction , Testing and Operation of a 1 MJ HTS Magnet at a 10 . 5 kV Superconducting,” pp. 0–3, 2012.
 - [37] L. Xiao *et al.*, “Development of the World ’ s First HTS Power,” vol. 22, no. 3, pp. 3–6, 2012.
 - [38] R. Gupta *et al.*, “Design , Construction and Testing of a Large Aperture High Field HTS SMES Coil,” no. April, pp. 1–7, 2016.
 - [39] L. Ren *et al.*, “Development of a Movable HTS SMES System,” vol. 25, no. 4, 2015.
 - [40] H. J. Kim *et al.*, “3 MJ / 750 kVA SMES System for Improving Power Quality,” vol. 16, no. 2, pp. 574–577, 2006.
 - [41] P. G. Scholar, “Design of SMES Control for Wind Generator Stability,” pp. 601–606, 2014.
 - [42] H. Jung, D. Park, H. Seo, M. Park, and I. Yu, “Power quality enhancement of grid-connected wind power generation system by SMES,” pp. 1–6, 2009.
 - [43] G. Joós and C. Abbey, “Use of Large Capacity SMES to Improve the Power Quality and Stability of Wind Farms.”
 - [44] L. Casimiro, “Controlo de conversores de eletrónica de potência para integração com SMES na melhoria da qualidade de energia elétrica (Dissertação de Mestrado),” Universidade Nova de Lisboa, 2013.

- [45] M. A. Afonso, *Sistema de Monitorização de Condições Meteorológicas e Correlação com Produção Renovável de Energia*. 2010.
- [46] N. Amaro, "Study of AC losses in medium-sized High Temperature Superconducting Coils," Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.
- [47] E. B. Rosa and F. W. Grover, *Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance (Revised)*. 1912.
- [48] S. Babic, S. Salon, and C. Akyel, "The mutual inductance of two thin coaxial disk coils in air," *IEEE Trans. Magn.*, 2004.
- [49] AMSC, "Amperium Copper Laminated Wire," p. 2, 2014.
- [50] N. Amaro, J. M. Pina, J. Martins, J. M. Ceballos, and A. Alvarez, "A fast algorithm for initial design of HTS coils for SMES applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 4–7, 2013.